

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

ATUALIZAÇÃO TECNOLÓGICA DO TORNO CSEPEL ERI-250

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA À UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA

Héctor Guillermo Muñoz Romero

FLORIANÓPOLIS, AGOSTO DE 1995

ATUALIZAÇÃO TECNOLÓGICA DO TORNO CSEPEL ERI-250

Héctor Guillermo Muñoz Romero

ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE:

MESTRE EM ENGENHARIA

ESPECIALIDADE ENGENHARIA MECÂNICA E APROVADA EM SUA FORMA  
FINAL PELO CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA.

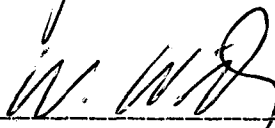


Carlos Alberto Martin, Dr.-Ing.  
ORIENTADOR



Antônio Fabio Carvalho da Silva, Dr. Eng.  
COORDENADOR DO CURSO

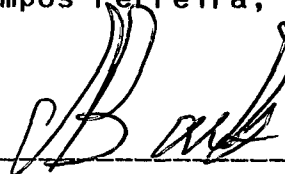
BANCA EXAMINADORA



Walter Weingaertner, Dr.-Ing.  
PRESIDENTE



Aureo Campos Ferreira, Ph.D.



Nelson Back, Ph.D.

## DEDICATORIA

A duas pessoas muito queridas que  
infelizmente já não estão neste mundo:

À Meu Pai, Fernando Muñoz Osorio

À Meu Amigo, Aurélio Bessa da Veiga

## AGRADECIMENTOS

Muitas pessoas, de uma forma ou outra, colaboraram para o desenvolvimento deste trabalho: Assim, gostaria de deixar registrado o meu agradecimento.

Ao Corpo de professores do Departamento de Engenharia mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina por a oportunidade de haber sido aluno do curso de pós-graduação.

Ao meu orientador, Prof. Carlos Alberto Martin, pelo acompanhamento constante dispensado ao trabalho e pela atenção com que sempre me recebeu.

Aos amigos, colegas de estudo e pessoal do Laboratorio de Harware do GRUCON, pela presteza e boa vontade com que sempre me atenderam e auxiliaram.

Agradeço também à Universidad de Santiago de Chile pela bolsa de estudo concedida.

## INDICE

	Página
LISTA DE SIGLAS .....	I
LISTA DE FIGURAS .....	K
LISTA DE TABELAS .....	N
LISTA DE SÍMBOLOS DE FÓRMULAS.....	N
LISTA DE UNIDADES .....	P
RESUMO .....	Q
ABSTRACT .....	R
CAPÍTULO 1       INTRODUÇÃO.....	01
1.1   Objetivos gerais.....	05
1.2   Objetivos específicos.....	05
CAPITULO 2       REVISÃO DE CONCEITOS BÁSICOS.....	06
2.1   Introdução.....	06
2.2   Características gerais das	
máquinas-ferramenta CNC.....	07
2.3   Conceito de retrofitting.....	09

## Pagina

2.4	Servo-acionamentos nas máquinas-ferramenta.....	10
2.4.1	Sevo-motores e amplificadores de potência...	10
2.4.2	Elementos mecânicos de transmissão.....	14
2.4.3	Sistemas de medição.....	14
2.4.4	Comando numérico.....	15
2.5	Comportamento dinâmico de um sistema de posicionamento .....	16

CAPITULO 3	ATUALIZAÇÃO TECNOLÓGICA DE MÁQUINAS- FERRAMENTA.....	25
3.1	Introdução .....	25
3.2	Considerações para avaliar a viabilidade de retrofitting.....	28
3.2.1	Introdução.....	28
3.2.2	Características técnicas desejáveis da máquina.....	29
3.2.3	Estado da máquina antes do retrofitting.....	30
3.3	Diagrama lógico para desenvolver o projeto retrofitting.....	31
3.3.1	planejamento do projeto/compras.....	32
3.3.2	Planejamento do projeto/serviços.....	32
3.3.3	Execução do projeto retrofitting.....	33
3.3.4	Testes finais e ajustes .....	33

3.3.5 Acompanhamento do desempenho	
da máquina em serviço.....	34
3.3.6 Diagrama de fluxo do projeto	
retrofitting .....	35

## CAPÍTULO 4 ATUALIZAÇÃO TECNOLÓGICA DO TORNO NC ERI-250.. 38

4.1 Introdução .....	38
4.2 Avaliação preliminar .....	38
4.2.1 Características técnicas desejáveis do torno	38
4.2.2 Estado da máquina antes da atualização .....	39
4.2.3 Avaliação técnica econômica preliminar .....	39
4.3 Avaliação final .....	40
4.3.1 Características técnicas desejáveis do torno	40
4.3.2 Avaliação final do estado da máquina antes	
da atualização .....	41
4.3.3 Modificações que deveriam ser feitas para	
uma adequada atualização do torno .....	42
4.3.4 Avaliação técnica econômica final .....	45
4.4 Descrição do trabalho desenvolvido .....	46
4.5 atividades não realizadas .....	51

CAPÍTULO 5	ENSAIOS DINÂMICOS DOS SISTEMAS DE POSICIONAMENTO DO TORNO .....	53
5.1	Introdução .....	53
5.2	Características técnicas dos sistemas de medição empregados nos ensaios .....	54
5.3	Ensaio realizado para o ajuste do filtro regulador da velocidade.....	55
5.4	Resposta no domínio tempo do sistema a uma excitação do tipo degrau.....	61
5.5	Resposta em frequência dos servo-acionamentos dos eixos "X", "Z".....	68
5.6	Resultados dos ensaios .....	76
5.7	Modelamento matemático dos servo-posicionadores "X" e "Z" do torno CSEPEL ERI-250.....	79
5.7.1	Introdução .....	79
5.7.2	Modelo matemático simplificado do servo-motor CC.....	80
5.7.3	Modelo matemático baseado nos resultados experimentais temporais .....	82
5.7.4	Modelamento matemático baseado nos ensaios de resposta em frequência .....	84
CAPÍTULO 6	RESULTADOS, CONCLUSÕES E SUGESTÕES.....	86
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	89



## LISTA DE SIGLAS

AMP:	Sistema de medição de corrente.
AGV:	Veículos Guiados Automaticamente.
AP:	Amplificador de Potencia.
APEC:	Comunidade Econômica Asia Pacífico.
CA:	Corrente Alternada.
CAD:	Desenho Assistido por Computador.
CAE:	Engenharia Assistida por Computador.
CAM:	Manufatura Assistida por Computador.
CAI:	Programação Assistida por Computador.
CC:	Corrente Continua.
CGP:	Circuito Gerador de Pulsos.
CIM:	Manufatura Integrada por Computador.
CLP:	Controlador Lógico Programavel.
CNC:	Comando Numérico Computarizado.
CSA:	Analizador de Sistemas de Controle.
DNC:	Comando Numérico Direito.
EMC:	Departamento de Engenharia Mecânica.
ENC:	"Encoder".
FMC:	Célula de Manufatura Flexível.
FT:	Função Transferência.
GRUCON:	Grupo de Comando Numérico.

MDI:	Entrada Manual de Dados.
MERCOSUL:	Mercado Comum Sul-Americano.
MEX:	Servo-motor do Eixo X.
MEZ:	Servo-motor do Eixo Z.
MF:	Motor Principal.
MHV:	Motor Para a Unidade de Refrigeração.
MO:	Motor Para a Unidade de Lubrificação.
MRF:	Motor Para Acionar a Troca de Ferramentas.
MT:	Motor Para a Unidade Hidráulica.
NAFTA:	Mercado Comum Norte-Americano.
NC:	Comando Numérico
P:	Proporcional.
PI:	Proporcional, Integral.
PID:	Proporcional, Integral, Derivativo.
RI:	Regulador de Corrente.
RP:	Regulador de Posição.
RV:	Regulador de Velocidade.
SM:	Sistema de Medição.
S-M:	Servomotor.
TG:	Taco-gerador.
UFSC:	Universidade Federal de Santa Catarina.
X:	Movimento Transversal do Torno.
Z:	Movimento Longitudinal do Torno.

## LISTA DE FIGURAS

- Figura 2.1** Variação do torque do motor CC respeito da velocidade.
- Figura 2.2** Diagrama de blocos simplificado de uma malha de controle de posição linear.
- Figura 2.3** Valores característicos de um sistema com função transferência de terceira ordem.
- Figura 2.4** Processo de posicionamento de um ciclo de controle de posição, (sistema de terceira ordem e sem tempo morto).
- Figura 2.5** Diagrama de Bode de amplitude e resposta no tempo, para uma excitação do tipo degrau no sistema de controle de posição de segunda ordem.
- Figura 4.1** Laiote físico do conjunto da máquina, CNC, gabinetes e cabos de conexão.
- Figura 4.2** Esquema do torno CSEPEL ERI-250.
- Figura 4.3** Cadeia cinemática para as RPM da árvore.
- Figura 5.1** Filtro regulador de velocidade implementado nos servo-posicionadores dos eixos X e Z.
- Figura 5.2** Montagem do sistema de ensaio para a otimização do filtro regulador de velocidade.
- Figura 5.3** Resposta ao degrau no tempo do servo-acionador do eixo X.
- Figura 5.4** Resposta ao degrau no tempo do servo-acionador do eixo Z.

- Figura 5.5** Esquema de montagem para ensaio temporal **sem** filtro regulador, casos "A" e "B".
- Figura 5.6** Esquema de montagem para ensaio temporal **com** filtro regulador, casos "C" e "D".
- Figura 5.7** Resposta no tempo ao degrau do servo-acionador do eixo X; **sem** acoplamento e **sem** filtro regulador de velocidade.
- Figura 5.8** Resposta no tempo ao degrau do servo-acionador do eixo X; **com** acoplamento e **sem** filtro regulador de velocidade.
- Figura 5.9** Resposta no tempo ao degrau do servo-acionador do eixo X; **sem** acoplamento e **com** filtro regulador de velocidade.
- Figura 5.10** Resposta no tempo ao degrau do servo-acionador do eixo X; **com** acoplamento e **com** filtro regulador de velocidade.
- Figura 5.11** Resposta no tempo ao degrau do servo-acionador do eixo Z; **sem** acoplamento e **sem** filtro regulador de velocidade.
- Figura 5.12** Resposta no tempo ao degrau do servo-acionador do eixo Z; **com** acoplamento e **sem** filtro regulador de velocidade.
- Figura 5.13** Resposta no tempo ao degrau do servo-acionador do eixo Z; **sem** acoplamento e **com** filtro regulador de velocidade.

- Figura 5.14** Resposta no tempo ao degrau do servo-acionador do eixo Z; com acoplamento e com filtro regulador de velocidade.
- Figura 5.15** Resposta em frequência do servo-acionamento do eixo X para o caso de: sem acoplamento e sem filtro regulador de velocidade.
- Figura 5.16** Resposta em frequência do servo-acionamento do eixo X para o caso de: sem acoplamento e com filtro regulador de velocidade.
- Figura 5.17** Resposta em frequência do servo-acionamento do eixo X para o caso de: com acoplamento e com filtro regulador de velocidade.
- Figura 5.18** Resposta em frequência do servo-acionamento do eixo Z para o caso de: sem acoplamento e sem filtro regulador de velocidade.
- Figura 5.19** Resposta em frequência do servo-acionamento do eixo Z para o caso de: sem acoplamento e com filtro regulador de velocidade.
- Figura 5.20** Resposta em frequência do servo-acionamento do eixo Z para o caso de: com acoplamento e com filtro regulador de velocidade.
- Figura 5.21** Diagrama de blocos do servo-posicionador.
- Figura 5.22** Diagrama de blocos simplificado do servo-posicionador.
- Figura 5.23** Simulação da equação 5.11.

## LISTA DE TABELAS

Tabela 5.1	Valores dos componentes que formam o filtro regulador da velocidade dos eixos X e Z.
Tabela 5.2	Resumo dos parâmetros do sistema, obtidos com base nos ensaios temporais dos servo-acionamentos dos eixos X e Z.
Tabela 5.3	Frequência de corte $\omega_0$ e o ganho $K_v$ obtido dos ensaios de resposta em frequência.
Tabela 5.4	Resumo dos parâmetros calculados baseado nos ensaios de resposta em frequência.

## LISTA DE SÍMBOLOS DE FÓRMULAS

$\vartheta(s)$ :	Deslocamento do Eixo do Motor.
$C_1$ :	Capacitância para definir a ação integral do filtro regulador de velocidade.
$C_2$ :	Capacitância para reduzir os picos da tensão de comando do amplificador de potência.
$C_t$ :	Capacitância para filtrar o sinal do taco-gerador.
$D$ :	Coeficiente de amortecimento.
$D_a$ :	Coeficiente de amortecimento do sistema.

$D_1$ :	Coeficiente de amortecimento do sistema global.
$\Delta X$ :	Erro de seguimento.
$D/DT$ :	Derivada respeito do tempo.
$D_z$ :	Diodo "Zener" encarregado de limitar a tensão de saída do filtro regulador de velocidade.
$F$ :	Coeficiente de atrito viscoso no eixo do motor.
$f_c$ :	Frequencia de corte.
$J$ :	Momento de inércia no eixo do motor.
$K_b$ :	Constante elétrica do motor.
$K_m$ :	Constante mecânica do motor.
$K_v$ :	Ganho.
$R$ :	Ripple.
$R_1$ :	Resistência para definir a ação integral do filtro regulador de velocidade.
$R_a$ :	Resistência de armadura do motor.
$R_c$ :	Resistência para o sinal $V_c$ .
$R_t$ :	Resistência para filtrar o sinal $V_{tg}$ .
$R_{tg}$ :	Resistência para o sinal $V_{tg}$ .
$S_p$ :	Sobrepasagem.
$T$ :	Tempo de resposta.
$T_d$ :	Tempo morto.

$V_a$ :	Tensão de armadura.
$V_c$ :	Tensão de comando ou entrada do regulador de velocidade.
$V_s$ :	Tensão de comando do amplificador de potência
$V_{tg}$ :	Tensão do taco-gerador.
$W_0$ :	Frequência natural.
$W_{0a}$ :	Frequência angular natural do sistema.
$W_{0l}$ :	Frequência natural do sistema global.
$W_{90}$ :	frequência angular para desfase de 90°.
$W_e$ :	Frequência angular de corte.
$W_{e1}$ :	Frequência angular de corte para um sistema de terceiro ordem.
$W_g$ :	Frequência angular limite.
$W_r$ :	Frequência de ressonância.
$X_1$ :	Valor atual da posição.
$X_s$ :	Valor da posição comandada ou desejada.

#### LISTA DE UNIDADES

$K\Omega$ :	Kilo ohm.
mF:	Micro Farádios.
RPM:	Revoluções por minuto.



## RESUMO

Este trabalho apresenta um procedimento e critérios para serem aplicados na análise e avaliação da alternativa de fazer atualização tecnológica de uma máquina-ferramenta frente à aquisição de uma máquina nova.

O procedimento de atualização tecnológica é aplicado ao torno revolver NC marca CSEPEL, modelo ERI-250, do Departamento de Engenharia Mecânica da UFSC, com projeto e execução das diversas etapas do processo, (avaliação da alternativa, planejamento e execução do trabalho). Produto deste esforço, o torno antes mencionado ficou com todas as suas funções habilitadas, (mudança automática de ferramentas e de velocidades da árvore, posicionamento dos carros longitudinal e transversal, etc.), comandado por um CNC, marca DYNAPATH modelo DELTA 20T, de 1992. O custo aproximado foi de US\$ 10.000,00 irrisório, se comparado a uma inversão da ordem de US\$ 70.000 necessária à aquisição de um torno CNC moderno de características similares.

## ABSTRACT

This work presents a procedure and criterion that can be applied to the analysis and evaluation of the alternative of retrofitting a machine tool, instead of acquiring a new machine.

The retrofitting procedure is applied to a NC turret lathe trademark CSEPEL, model ERI-250, of the Mechanical Engineering Department of the UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA, with project and execution of several stages, (evaluation, planning, and building) of the process. As a result of this effort, the afore mentioned lathe was successfully upgraded using retrofitting to obtain the same characteristic as a comparable new machine (automatic change of tool, spindle speed, and positioning of the longitudinal and cross carriages, etc). This machine was commanded by a CNC, trademark Dynapath, model Delta 20T, year of fabrication 1992. The approximate cost was US\$10,000.00, which is inexpensive compared to a cost of about US\$70,000.00 necessary to acquire a new modern CNC lathe of similar characteristics.

## CAPITULO 1

### 1. INTRODUÇÃO

Já não resulta novidade afirmar que, uma vez mais, a profundidade e velocidade das transformações tecnológicas das últimas décadas, não têm paralelo na história. O desenvolvimento explosivo das tecnologias de informação, comunicação, automatização e controle estão remexendo os pilares de nossas estruturas tradicionais em todas as esferas da vida em sociedade. Microeletrônica, biotecnologia, supercondutividade, CAD, CAM, CAE, CIM, robótica e tantos outros ramos da ciência e da tecnologia estão abrindo horizontes insuspeitados para avanços cada vez mais impactantes.

Em verdade já não deveria surpreender que, as transformações tecnológicas são parte da realidade da nossa época. E preciso aceitar este avanço avassalador, que cria, e não poucas, tensões sociais e angústias pessoais. Basta mencionar os desajustes ecológicos e a incerteza de quem vê desaparecer seus postos de trabalho e tornar irrelevantes as capacidades profissionais cultivadas ao longo de toda uma vida. Mas estas mesmas transformações abrem oportunidades de desenvolvimento a pessoas, empresas e comunidades completas; ao mesmo tempo apresentam desafios formidáveis que é preciso

enfrentar. As transformações tecnológicas, em verdade, são capazes de provocar verdadeiras revoluções sociais como fruto da profundidade de seu impacto. Sem dúvida alguma, as tecnologias de transporte, comunicações e computação, por exemplo, foram fatores determinantes na globalização dos mercados. Foram produzidas reestruturações profundas de indústrias e as alianças estratégicas entre firmas de distintos países mudaram o mapa competitivo do mundo. Os países que não estão dispostos a abrir as suas fronteiras ao comércio internacional, com o propósito de proteger suas fontes de trabalho, podem terminar por impor custos indevidamente elevados à população em geral, como consequência da perda de bem-estar resultante da falta de acesso à bens de consumo mais baratos e de melhor qualidade. Assim entenderam os países europeus criando a UNIAO EUROPEIA; Estados Unidos, México e Canadá criando o NAFTA; o MERCOSUL, constituído por Uruguai, Paraguai, Argentina, e Brasil, aos que, seguramente se somarão paulatinamente os outros países vizinhos, formando talvez o mercado comum sul-americano; e recentemente o APEC formado por países da zona do pacífico.

Nesse contexto, cada empresário se verá na obrigação de efetuar as mudanças que se requerem para enfrentar com êxito os desafios, (oportunidades e ameaças), que emergem das transformações tecnológicas. E mais ainda, as empresas do setor produtivo já tiveram que incorporar tecnologias de ponta para manter sua competitividade nos mercados internacionais;

porém, o principal obstáculo para que as empresas contem com estas tecnologias é o seu custo de aquisição elevado, o que para empresas médias e pequenas se torna mais crítico ainda.

Assim, por exemplo, a alta competitividade exige que a indústria metal-mecânica conte com sistemas de manufatura, (desde máquinas manuais até células de manufatura flexível), com o mais alto desempenho. Particularmente, no caso das máquinas-ferramenta esta alta exigência requer, entre outros, de: grande rigidez na sua estrutura, excelente confiabilidade e repetibilidade dos sistemas de posicionamento, redução ao máximo dos tempos improdutivos mas, com o transcurso do tempo, as máquinas começam a apresentar sintomas que indicam o fim de sua vida útil. Estes sinais de inadequação podem ser um excessivo desgaste nas partes móveis (guias, mancais, fusos e outros elementos de transmissão), e/ou por desatualização tecnológica, atraso e obsolescência presentes em sistemas de posicionamento lentos e de características dinâmicas pobres.

Um pequeno ou médio empresário poderia sentir-se desmotivado pelo dispendioso que é contar com um sistema de manufatura adequado aos novos tempos. Surge porém, uma alternativa menos cara, mais acessível e assim economicamente mais conveniente, que é, a modernização tecnológica de máquinas operatrizes já existentes na indústria, metodologia que empresas como ROMI, TRW, ITAMASA e outras levaram a cabo

com grande êxito. As máquinas consideradas candidatas à modernização, podem estar atrasadas em relação às mais modernas que o mercado oferece basicamente em respeito a: unidades de comando numérico computadorizado e controladores lógicos programáveis, servo-conversores, servo-motores, assim como a elementos mecânicos (guias, mancais, redutores, acoplamentos, etc..), sistemas de medição e sensores. Os progressos ocorridos no desenvolvimento deste tipo de componentes significaram, e estão significando, uma redução dos custos e menor tempo de entrega, o que faz interessante avaliar a alternativa de modernizar a máquina frente a sua substituição por outra nova. Outro fator de interesse é o fato de que as máquinas novas existentes no mercado são de alta precisão e grande produtividade, só que seu alto custo não as torna atraentes a uma parcela significativa da indústria, que requer máquinas CNC, de precisão média, e/ou seu volume de mercado é menor, tal que uma máquina moderna teria muito tempo ocioso, devido à sua grande capacidade de trabalho, o que pode inviabilizar a inversão em maquinaria moderna.

Esta realidade oferece a oportunidade, no contexto de atualização de máquinas operatrizes convencionais ou com NC obsoleto, transformá-las em máquinas com CNC de última geração ou outro grau de automatização, dependendo da avaliação técnico-econômica correspondente a cada caso.

### 1.1 OBJETIVO GERAL

Dar uma pauta geral a respeito do procedimento a ser seguido para realizar uma adequada avaliação do projeto de atualização tecnológica de máquinas-ferramenta.

### 1.2 OBJETIVO ESPECÍFICO

Na década do 70, chegou ao EMC/UFSC o torno revolver NC, marca CSEPEL, modelo ERI-250. Este torno foi a primeira máquina NC disponível no Departamento e por ele passaram várias gerações de estudantes, que aprenderam a dominar a técnica do NC; a orientação majoritária de seu uso foi dirigida ao treinamento e em menor escala para a produção. Ainda assim, nos últimos anos seu índice de falhas foi tamanho, que ficou "pseudo abandonada" por um tempo significativo e, nessas circunstâncias, o Laboratório de "Hardware" do grupo de comando numérico "GRUCON" o recolheu com o objetivo específico de reabilitá-lo para que volte a desempenhar seu propósito de servir como instrumento, com o qual novas gerações de estudantes do Departamento de Engenharia Mecânica da UFSC possam conhecer, aprender e se familiarizar com a técnica do CNC.

## CAPITULO 2

### 2. REVISÃO DE CONCEITOS BÁSICOS

#### 2.1 INTRODUÇÃO

Por várias razões, a demanda dos mercados está adquirindo características de fragmentação e instabilidade, com uma exigência de produtos em séries pequenas e médias e de uma grande variedade e alta qualidade a custo competitivo.

Por isto, os sistemas de manufatura rígidos são impróprios para satisfazer as novas exigências dos consumidores. Neste novo ambiente da demanda, é preciso atender rapidamente às novas tendências da demanda e produzir uma grande variedade de produtos em séries pequenas ou médias com flexibilidade, qualidade e produtividade.

Por um lado, os sistemas de manufatura altamente dedicados são inflexíveis e sua modificação para outra variedade de peças não é possível, ou exige altos custos por troca de acessórios e de preparação das máquinas. Por outro lado, os sistemas convencionais e universais levam a altos custos de fabricação devido ao uso intensivo de operários e elevados tempos de preparação, fabricação e transporte; especialmente por requerer acessórios, ferramentas, dispositivos de fixação das peças, administração e transporte



dos materiais, tempos de espera entre processos de fabricação e exigências intensivas de controle de qualidade para garantir uma produção isenta de defeitos.

Graças à aplicação de conceitos novos para organizar os sistemas produtivos e ao desenvolvimento da mecânica e da eletrônica, hoje é possível contar com instalações produtivas como: máquinas NC, máquinas CNC, centros de usinagem, células de manufatura flexível (FMC), robôs, veículos guiados automaticamente (AGV), sistemas automáticos de armazenamento, etc., adequados para a produção a custos baixos de volumes pequenos e médios de uma grande variedade de produtos.

## 2.2 CARACTERÍSTICAS GERAIS DAS MÁQUINAS-FERRAMENTA CNC

Para aumentar a qualidade das peças usinadas é necessário que a máquina-ferramenta tenha boas características estáticas e dinâmicas, parâmetros que permitem definir: os materiais, a estrutura, os elementos de acionamento, etc., com os quais se realizará a máquina. Isto é, não basta incorporar um sistema CNC para melhorar a qualidade das peças, é necessário ter em conta as características de funcionamento da máquina. Entre os aspectos dinâmicos que devem ser considerados podem-se citar: os efeitos causados pelos movimentos de deslocamento linear e de rotação, influência de alta e de baixa frequência externa, influência causada pelo processo de usinagem, particularmente as vibrações auto-excitadas.

As Máquinas-ferramenta NC possuem sistemas que permitem automatizar e controlar todas as ações da máquina, por exemplo:

- Movimento dos carros.
- Magnitude e sentido das velocidades.
- Troca de ferramenta.
- Liga /desliga refrigerante.
- Lubrificação, freios, pausas.
- Etc.

O emprego da tecnologia NC nas máquinas-ferramenta permite obter as seguintes vantagens:

- Facilita a planificação da produção.
- Capacidade de produzir peças complexas com um alto grau de automatização e flexibilidade.
- Uma elevada precisão na usinagem das peças.
- Melhora a repetibilidade.
- Reduz os tempos não produtivos (troca de ferramenta, troca de peças, etc.).
- Redução dos tempos e dos custos de inspeção.
- Melhores condições de usinagem, o que aumenta a vida útil da ferramentas.
- Economia de ferramentas e acessórios.
- Redução de peças defeituosas.
- Redução do tamanho do lote econômico.
- Qualidade das peças não dependente do operador.
- Etc.

### 2.3 CONCEITO DE "RETROFITTING"

A atualização tecnológica de máquinas operatrizes, conhecida universalmente por retrofitting, pode ser entendida em seu sentido mais amplo como a transformação de uma máquina operatriz convencional numa máquina CNC, ou, num conceito mais restrito, como a transformação de máquinas NC de gerações mais antigas em máquinas CNC de novíssima geração. Ou ainda, pode ser visto, como a automatização de outras funções de uma máquina utilizando controladores lógicos programáveis (CLP) e outros recursos mais simples.

Qualquer que seja a amplitude da aplicação do retrofitting, o objetivo final é modernizar a máquina a fim de que desempenhe suas funções de maneira melhor do que a original, adicionando à mesma novos e/ou diferentes recursos, inclusive recuperando funções e características perdidas por avaria.

Portanto, o retrofitting no seu sentido mais amplo pode chegar a elevados níveis de sofisticação e proporcionar à máquina convencional as características básicas e as vantagens da tecnologia do comando numérico como: a redução dos tempos secundários, a redução de custos de ferramentas, a eliminação de dispositivos especiais, a redução de tempos de usinagem, maior repetitividade das peças usinadas, redução do índice de rejeição de peças, usinagem economicamente atrativa para lotes pequenos e médios, eliminação de tempos de ajuste ("setup"), etc. /13/.

## 2.4 SERVO-ACIONAMENTOS NAS MÁQUINAS-FERRAMENTA

Os elementos funcionais dinâmicos mais críticos de toda máquina-ferramenta CNC são seus servo-acionamentos, (tanto os de avanço como os da árvore) e o controlador.

Um servo-acionamento, é composto principalmente de: controlador, servo-conversor, servo-motor, sistema mecânico de transmissão e/ou modificação do movimento, sistema de medição. As características e faixas de aplicação desses componentes ficam claramente especificadas nos catálogos dos fabricantes. A seguir se resumem os tipos e propriedades mais relevantes que poderão servir como uma primeira aproximação na seleção dos componentes citados.

### 2.4.1 SERVO-MOTORES E AMPLIFICADORES DE POTÊNCIA

A seleção desses elementos deve ser cuidadosamente avaliada, porque além de serem onerosos, são fundamentais para o funcionamento adequado do servo-acionamento. Parâmetros solicitados como torque máximo e faixas de velocidades requeridas são decisivos para a seleção. Por isso sua avaliação requer uma análise criteriosa da aplicação que será dada à máquina.

## Acionamento com servo-motores CC

Este tipo de acionamento apresenta as seguintes características:

- Alto torque também em baixas rotações, possibilitando a eliminação das reduções, o que elimina as folgas e assim melhora a precisão do acionamento.
- bom controle da velocidade também para baixas velocidades, permitindo um controle adequado em acionamentos de avanço, o que aplicado em máquinas-ferramenta se reflete em uma boa qualidade superficial e precisão geométrica da peça fabricada.
- alta dinâmica de aceleração e frenagem, dado a alta relação torque produzido/momento de inércia do servo-motor.

Quanto às limitações dos servo-acionamentos CC:

- O servo-motor CC requer manutenção preventiva do sistema de escovas de comutação mecânica da corrente.
- o momento de inércia dos servo-motores CC não pode ser reduzido além de um certo valor, devido à sua configuração física. Para condições de torque semelhantes, o momento de inércia dos servo-motores CA é menor /36/.

- para altas velocidades de rotação, o servo-motor perde progressivamente, seu torque disponível, (figura 2.1).

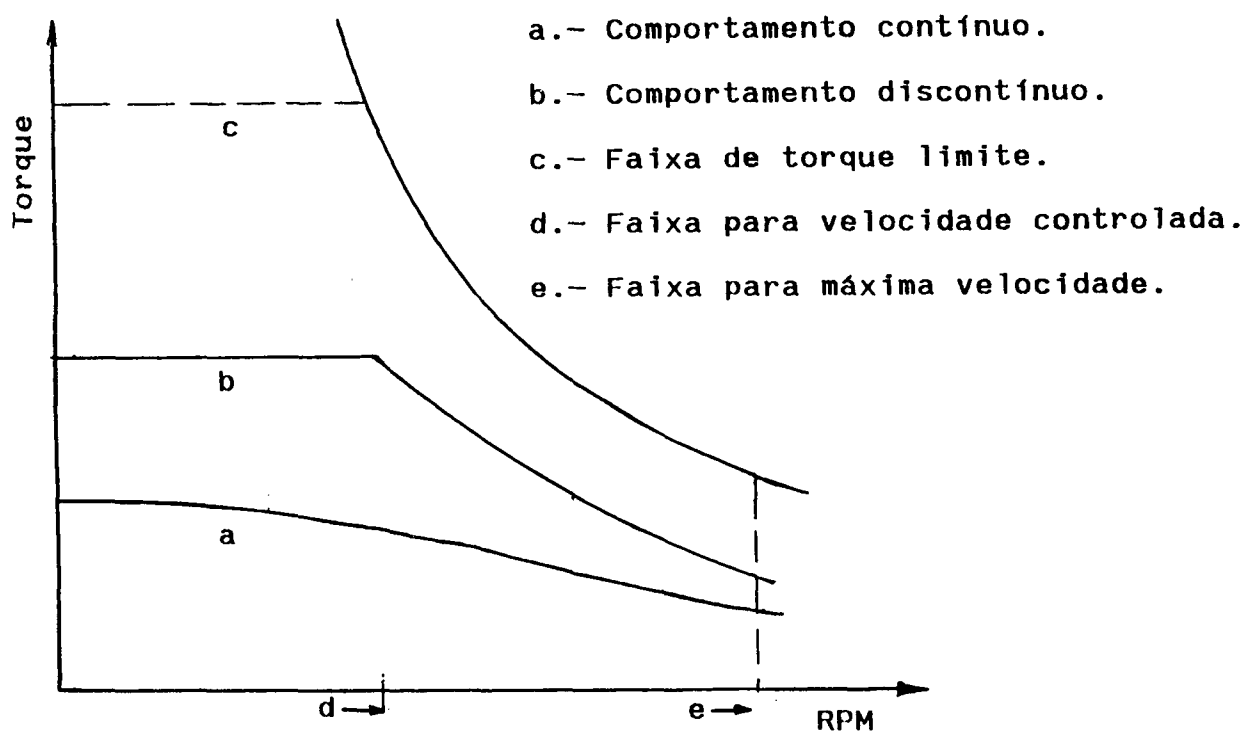


Figura 2.1 Variação do torque do motor CC respeito da velocidade.

#### Acionamento com servo-motores CA

A ausência de comutador é a grande vantagem das máquinas de campo eletromagnético girante sobre as de corrente contínua.

Ao fazer uma comparação dos servo-motores CA com os CC pode-se destacar que os CA apresentam:

- Menores custos
- Maiores potências limites
- Maiores velocidades
- Melhores graus de proteção (exemplo: trabalhar em zona de gases combustíveis).
- Menor relação peso/potência
- Menor momento de inércia
- Menor manutenção
- Menor probabilidade de falhas

Existe uma forte tendência, de que os acionamentos CA utilizam servo-motores CA síncronos, devido às suas vantagens em relação aos servo-motores assíncronos. A permanente e rápida evolução da eletrônica permite, que os conversores CA se tornem cada vez mais confiáveis, mais compactos, e de menor custo, viabilizando cada vez mais seu uso. De fato, os servo-acionamentos CC estão sendo cada vez menos usados, /36/.

Além dos motores CC e CA, existem os motores de passo, só que são bastante limitados por seu baixo torque e dinâmica inferior, pelo que sua aplicação se restringe a periféricos de computadores, máquinas de pequeno porte, etc.

#### 2.4.2 ELEMENTOS MECÂNICOS DE TRANSMISSÃO

Corresponde ao conjunto de elementos mecânicos que transmitem o movimento desde o eixo do motor até o carro ou árvore da máquina-ferramenta, como exemplos: acoplamentos, guias, porca e parafuso, pinhão e cremalheira, correias e polias, engrenagem, etc. /5/, /2/.

#### 2.4.3 SISTEMAS DE MEDIÇÃO

Em um sistema para o controle do movimento são empregados principalmente sistemas de medição, (SM), de velocidade e os SM de posição.

##### SM de velocidade

Geralmente vem integrados ao servo-motor, produzindo um sinal proporcional à velocidade, que é realimentado ao comparador do regulador de velocidade e assim melhorando o comportamento dinâmico ao aumentar o coeficiente de amortecimento do sistema. /1/.

##### SM de posição

Atualmente, os SM de posição mais empregados são os codificadores angulares (encoders) e as escalas opto-eletrônicas. Para a seleção do SM de posição deve-se considerar:

- O SM deve apresentar uma resolução pelo menos 10X maior do que a resolução desejada.
- Em sistemas de transmissão com folga é desejável empregar SM diretos.



#### 2.4.4 COMANDO NUMÉRICO

O NC pode ser definido como o emprego de um dispositivo para operar automaticamente as máquinas-ferramenta, mediante códigos de letras, números e caracteres especiais. O conjunto completo de códigos de instruções para a execução e operação da máquina, é chamado programa. O programa é transformado em sinais elétricos correspondentes, para comandar todos os movimentos da máquina. A máquina CNC pode ser programada manualmente, (MDI), ou com ajuda do computador (CAP) /37/.

Muitos tipos de CNC são possíveis de encontrar no mercado, como segue: FANUC, ALLEN-BRADLEY, GE, OKUMA, DYNAPATH, BENDIX, MAZAK, etc.

Na seleção do CNC deve-se considerar:

- Tipo de trajetórias,( ponto a ponto, contínua).
- Número de eixos a comandar.
- Número da árvores da máquina.
- Número de ferramentas.
- Linguagem de programação alternativas além do ISO.
- Tipos de CNC já existentes na indústria.
- Possibilidade de fazer DNC.
- Apoio técnico.
- Procedência.
- Possibilidade de formar uma FMC.

## 2.5 COMPORTAMENTO DINÂMICO DE UM SISTEMA DE POSICIONAMENTO

As exigências de qualidade dos posicionadores das máquinas-ferramenta são cada vez mais severas, pois são os responsáveis por gerar o movimento relativo entre peça e ferramenta para obter a macrogeometria e as dimensões das peças usinadas. Por tal razão, os sistemas de controle necessitam coordenar da melhor forma possível os movimentos dos múltiplos graus de liberdade da máquina-ferramenta.

A figura 2.2 mostra um diagrama de blocos simplificado de um posicionador linear em malha fechada. Geralmente, o controlador de posição tem um comportamento proporcional, definido por  $K_v$  (ganho na malha de controle de posição), o qual está definido por:

$$K_v = \frac{V_s}{\Delta x} \quad (2.1)$$

Onde:

$K_v$  = ganho na malha de controle de posição;

$V_s$  = valor de comando da velocidade desejada e

$\Delta X$  = erro de seguimento.

Para ter um movimento com velocidade constante é necessário provocar um erro de seguimento "  $\Delta X$ ", dado por.

$$\Delta X = V_s / K_v \quad (2.2)$$

O erro de seguimento não gera desvios para movimentos retilíneos quando o ganho de posicionamento de todos os eixo são iguais.

A curva de resposta em frequência do controle de posição, incluindo o SM de posição é dado por.

$$K_v = V_s(j\omega)/\Delta x(j\omega) \quad (2.3)$$

O filtro regulador de velocidade normalmente é do tipo PI. Ajustando adequadamente o controlador, o amplificador de potência, o servo-motor e os sistemas de transmissão mecânicos, o sistema pode ficar dominado por um comportamento de primeira ou segunda ordem, com ou sem atraso. Ver figura 2.2. /01/.

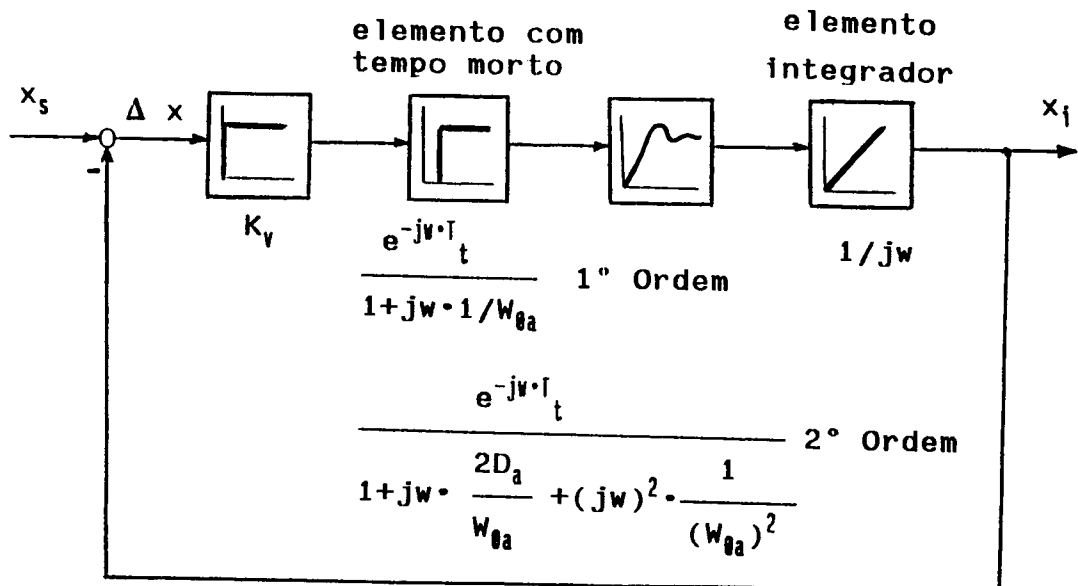


Figura 2.2 Diagrama de blocos simplificado de uma malha de controle de posição linear./01/.

Onde:

- $X_i$  = valor atual da posição;
- $X_s$  = valor da posição comandada ou desejada;
- $D_a$  = coeficiente de amortecimento do sistema;

$W_{0a}$  = freqüência angular natural do sistema não amortecido;

$T_m$  = tempo morto do sistema e

$K_v$  = ganho da malha de posição.

A característica comum de todos os sistemas de posição em malha fechada das máquinas-ferramenta é o comportamento do tipo integrativo do sistema de controle entre a velocidade e a posição, ou seja:

$$V_i = \frac{DX_i}{DT} \quad \text{ou} \quad \frac{X_i(j\omega)}{V_i(j\omega)} = \frac{1}{j\omega} \quad (2.4)$$

Os parâmetros mais importantes do sistema fechado de posicionamento são;  $K_v$ ,  $W_{0a}$ ,  $D_a$  e  $T_m$  (ver figura 2.2). " $W_{0a}$ " e " $D_a$ " são de máxima importância no projeto de um posicionador e na seleção dos componentes. Quando mais alta a freqüência natural (" $W_{0a}$ "), maior é a rapidez de reação do posicionador e menores as distorções provocadas nos sinais. O fator de amortecimento " $D_a$ " representa a razão de redução de amplitude das oscilações do posicionador;  $0 < D_a < 1$  caracteriza sistemas mais rápidos mas com oscilações;  $D_a > 1$  caracteriza sistemas isentos de oscilações mas mais lentos; sistemas com  $D_a < 0$  são instáveis.

O tempo morto " $T_m$ " é uma característica típica do amplificador de potência tiristorizado. Representa o tempo que necessita para reagir ao sinal de comando imposto ao amplificador de potência. A magnitude de " $T_m$ " é função da configuração ou tipo de amplificador. Para o caso do amplificador de potência de seis tiristores, operando em rede de 60 Hz,  $T_m$  é de 4 milissegundo.

Do diagrama de blocos da figura 2.2, considerando o servo-posicionador com comportamento de primeira ordem e sem elemento de tempo morto, resulta na função transferência seguinte:

$$FT(j\omega) = \frac{X_i(j\omega)}{X_s(j\omega)} = \frac{1}{1 + j\omega \cdot \frac{1}{K_v} + (j\omega)^2 \cdot \frac{1}{K_v \cdot W_{\theta a}}} \quad (2.5)$$

Se pode redefinir:

$$W_{\theta l} = \sqrt{K_v \cdot W_{\theta a}}$$

$$D_l = 0.5 \cdot \sqrt{W_{\theta a}/K_v}$$

onde:

$W_{\theta l}$  : frequência natural do sistema global e

$D_l$  : coeficiente de amortecimento do sistema global.

Analogamente, considerando o servo-posicionador com comportamento de segunda ordem e sem tempo morto, resulta a função transferência seguinte:

$$FT(j\omega) = \frac{1}{1 + j\omega \cdot \frac{1}{KV} + (j\omega)^2 \cdot \frac{2 D_a}{W_{\theta a} \cdot K_V} + (j\omega)^3 \cdot \frac{1}{K_V \cdot (W_{\theta a})^2}} \quad (2.6)$$

Para sistemas com função transferência com grau maior que dois, o coeficiente de amortecimento e a frequência natural nominal não podem ser definidas como no caso de elementos de segunda ordem. As características do comportamento dinâmico para um sistema de terceira ordem são as seguintes, ver figura 2.3.

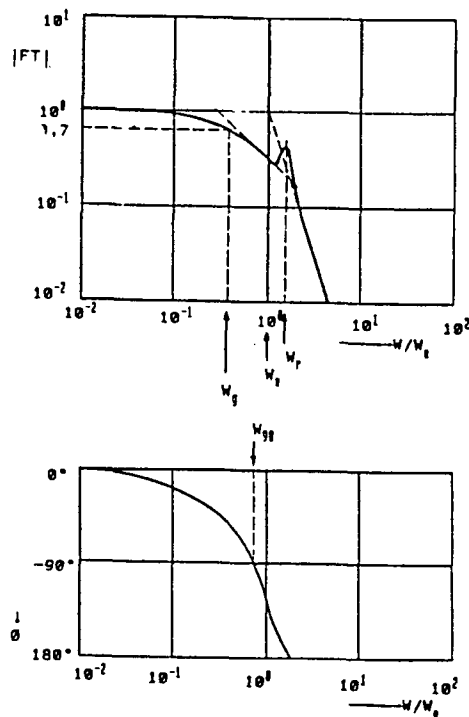


Figura 2.3 Valores característicos de um sistema com função transferência de terceira ordem.

onde:

- $W_e$  : frequência angular de corte;  
 $W_g$  : frequência angular limite;  
 $W_{90}$  : frequência angular para desfase de  $90^\circ$ ;  
 observação: Para o caso de um sistema de segunda ordem  $W_{90} = W_C$  e  
 $W_r$  : frequência angular de ressonância.

O conhecimento de " $W_e$ " permite dividir o comportamento do sistema em duas partes. Para frequências de excitação menores que " $W_e$ " a distorção da resposta é baixa e para frequência de excitação superiores a " $W_e$ " a distorção da resposta é muito alta. Isso significa que para valores altos de " $W_e$ " o de posicionamento pode ser executado sem sobrepassagem e com grande rapidez. /01/.

Para uma malha de controle de posição com uma função transferência de terceira ordem, a frequência angular de corte é dada por:

$$W_{el} = W_{\theta a} \cdot \sqrt[3]{K_v / W_{\theta a}} \quad (2.8)$$

Para obter um comportamento favorável do posicionador, é recomendável que:

$$0.6 \leq (W_{el} / W_{\theta a}) \leq 0.7 \quad (2.9)$$

E para evitar oscilações o coeficiente de amortecimento do sistema global deve ser " $D_1 > 1$ ".

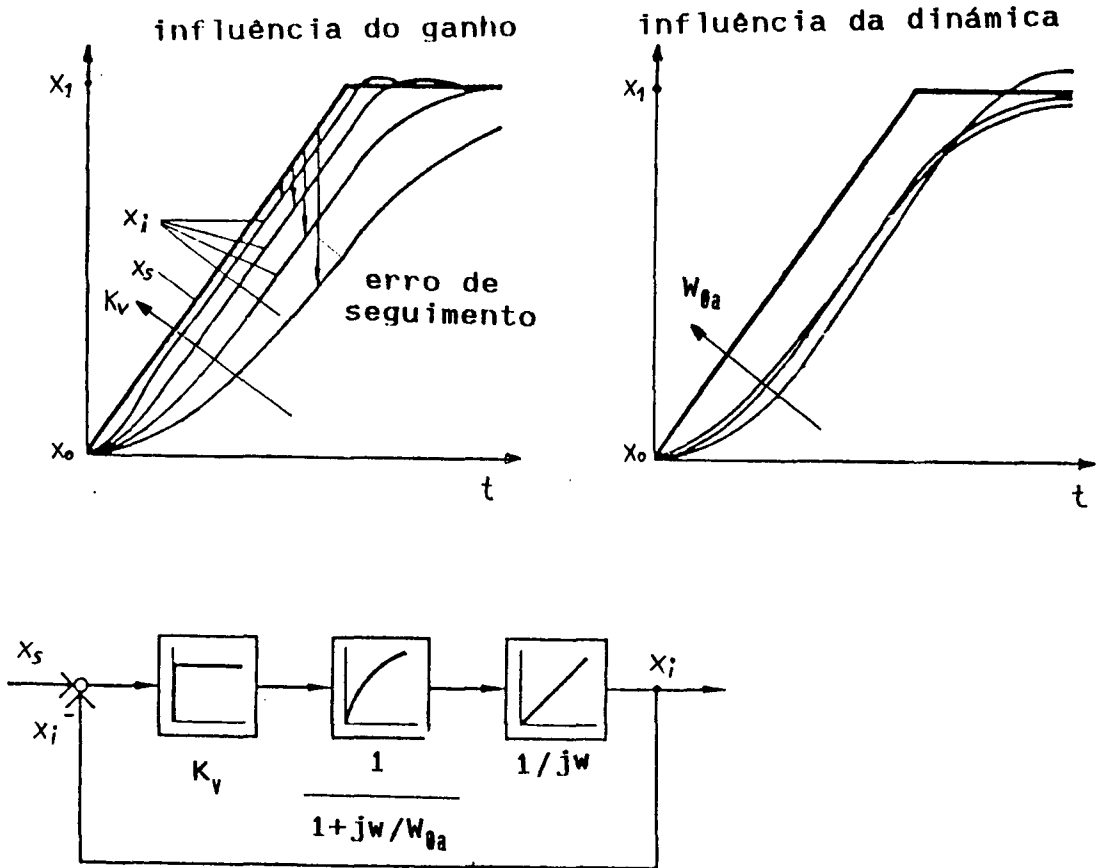


Figura 2.4 Processo de posicionamento de um ciclo de controle de posição (sistema de primeira ordem e sem tempo morto)

As figuras 2.4 e 2.5 mostram o efeito dos parâmetros de um sistema de posicionamento para um servo-posicionador de primeira e segunda ordem, respectivamente.

A figura 2.4, no seu lado esquerdo, permite observar que com maior ganho " $K_v$ " da malha de posição, maior é a



sobrepassagem e menor o erro de seguimento "X". Na mesma figura, (lado direito), mostra como influi a freqüência natural nominal " $\omega_{0a}$ ", onde para " $\omega_{0a}$ " pequenos se pode apresentar sobrepassagem.

O lado esquerdo da figura 2.5 mostra a curva de resposta em freqüência para a amplitude. Cabe destacar que uma diminuição no coeficiente de amortecimento do sistema global " $D_1$ " e um incremento no ganho " $K_v$ ", a freqüência angular nominal do sistema de posicionamento  $\omega_{0l} = K_v \cdot \omega_{0a}$  aumenta, porém a zona de instabilidade também aumenta. Por outro lado, para um mesmo " $K_v$ ", um aumento de " $\omega_{0a}$ " faz com que " $\omega_{0l}$ " aumente.

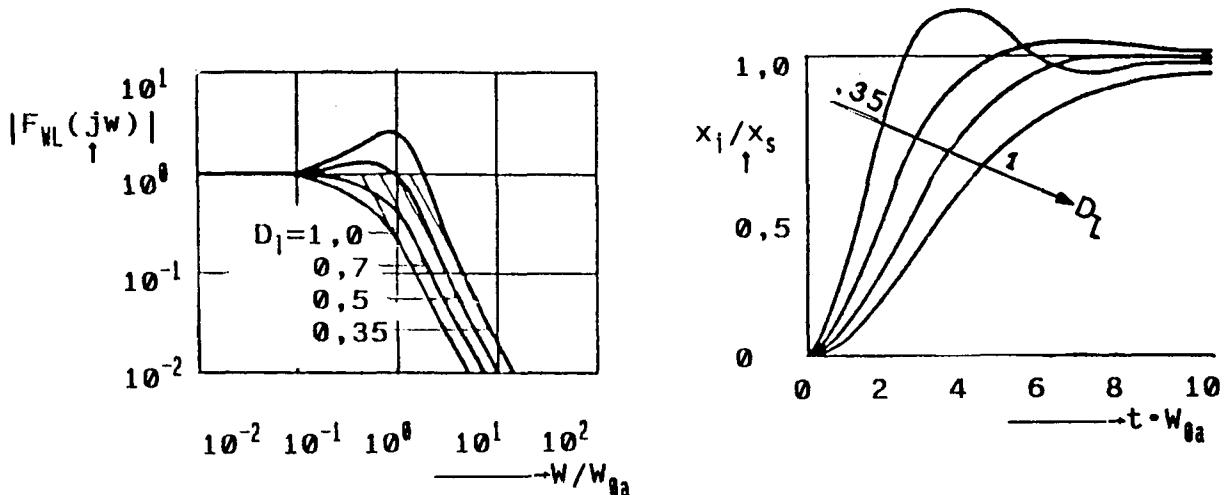


Figura 2.5 Diagrama de Bode de amplitude e resposta no tempo para uma excitação do tipo degrau no sistema de controle de posição de segunda ordem.

O lado direito da figura 2.5 mostra como influi o coeficiente de amortecimento na resposta; para  $0 < D_1$ , à medida que " $D_1$ " diminui a baixo de "1" o nível de sobrepassagem aumenta e para  $D_1 > 1$  não existem oscilações. /01/.

Da análise realizada, se pode deduzir que, para alcançar um adequado comportamento do sistema de posicionamento, se deve chegar a um compromisso entre a máxima frequência nominal " $\omega_1$ " e um suficiente grau de amortecimento para alcançar uma resposta, a mais rápida possível com um mínimo de sobrepassagem.

## CAPITULO 3

### 3. ATUALIZAÇÃO TECNOLÓGICA DE MÁQUINAS-FERRAMENTA

#### 3.1 INTRODUÇÃO

O "retrofitting", (ver 2.3), não deve ser aplicado de maneira generalizada a qualquer máquina ou em qualquer situação. É de fundamental importância uma análise cuidadosa, caso por caso. Ver-se-á que existem situações em que o retrofitting é antieconômico.

Sempre é preciso ter claramente definida a necessidade de automatizar parte do processo produtivo, por exemplo, com o propósito de se obter os benefícios proporcionados pela tecnologia CNC. Em outros casos, o processo produtivo já apresenta um determinado grau de automatização, só que os recursos existentes já estão obsoletos ou sua manutenção se torna inviável economicamente.

Em linhas gerais o retrofitting é recomendável quando se dispõe de máquinas de boa qualidade com uma boa concepção estrutural, quando se tem limitação de recursos financeiros para obtenção de máquina nova, quando a necessidade de automatização se torna urgente e o prazo de entrega de uma máquina nova é longo, quando somente o comando NC da máquina está obsoleto, ( por exemplo, quando sua manutenção se torna muito cara), etc.

Segundo a experiência, as melhores justificativas econômicas se dão para máquinas grandes e complexas, e em máquinas NC de gerações antigas; contudo, isso não significa que o retrofitting não seja técnica e economicamente viável em outras situações, sendo sempre necessária uma análise mais profunda, com base em paradigmas como os apresentados a seguir.

O processo de verificação da necessidade de atualizar tecnologicamente uma máquina se inicia com base nos seguintes fatores:

- Com a máquina CNC original não dá para fazer: troca automática de ferramentas e/ou peças; simular na tela a execução do programa peça; edição e manipulação de programas; comunicação com computadores e periféricos; operar em DNC ou FMC; compensar erros de posicionamento e de folgas dos eixos; armazenar vários programas simultaneamente, etc.
- A máquina já não oferece a precisão e conforto necessário para a tarefa à qual se destina.
- Os tempos de parada por manutenção estão cada vez mais elevados.
- Os custos de manutenção corretiva são cada vez mais altos.
- A máquina já não oferece confiabilidade.
- Muito espaço ocupado pelo NC original.
- Etc.

A discussão sobre a atualização deve ser conduzida em função da análise de determinados parâmetros que, ao serem cuidadosamente observados, garantam uma decisão acertada, como:

- Verificar a precisão geométrica atual da máquina e compará-la com a precisão requerida. Analisar se os níveis atuais de precisão da máquina são suficientes para a fabricação de peças com tolerâncias maiores e que estejam sendo usinadas em máquina similar mas em melhores condições.
- Verificar o estado geral da estrutura, barramentos, componentes mecânicos, elétricos, pneumáticos e hidráulicos da máquina. Com relação aos barramentos verificar se são necessários apenas ajustes ou um trabalho mais profundo de recuperação. Com relação às partes móveis, verificar folgas, níveis de vibração, ruídos, etc.
- Definir e relacionar com o máximo detalhamento possível os elementos que serão substituídos, modificados, agregados ou recuperados, que garantam alcançar os requisitos previamente fixados. Também especificar serviços a executar, definindo os prazos e os valores envolvidos.
- Orçamento, comparar os valores envolvidos na atualização tecnológica com o valor de aquisição de uma máquina nova

equivalente, levando em conta também os prazos de entrega em ambas alternativas. É difícil dar cifras comparativas. Apesar disso se recomenda como resultado dessa comparação, que os valores envolvidos na atualização sejam no máximo da ordem de 40% do custo da máquina nova colocada na fábrica. Evidentemente, à medida que as cifras se aproximem, se torna necessária uma análise mais profunda, tendo em conta que, geralmente, uma máquina nova é tecnologicamente superior à uma máquina atualizada. /13/.

### 3.2 CONSIDERAÇÕES PARA AVALIAR A VIABILIDADE DE RETROFITTING

#### 3.2.1 INTRODUÇÃO

No item 3.2.6 se apresenta um diagrama de fluxo do projeto retrofitting, tanto na etapa de análise preliminar, (avaliação rápida), como na análise detalhada, (avaliação final após a evidência de viabilidade dada na avaliação preliminar). A seguir se apresenta dois temas muito importantes para ajudar na avaliação técnica econômica do projeto retrofitting, estas são: características técnicas desejáveis da máquina e o estado da máquina antes do retrofitting.

### 3.2.2 CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DESEJÁVEIS DA MÁQUINA

Esta primeira etapa do projeto é fundamental, pois permitirá definir claramente a situação final, na qual deverá ficar a máquina "retrofitada", e que, em linhas gerais, é similar a de máquinas novas em eventual substituição. Contudo, as características verdadeiramente importantes são as requeridas no desempenho das tarefas específicas na empresa, a níveis técnicos e econômicos competitivos.

As características típicas desejáveis podem ser:

- Exigente qualidade superficial, geométrica e dimensional das peças a produzir. Isso implica em: sistemas de acionamento adequadamente controlados, por exemplo, sem sobre-passagem; guias com mínimas folgas, grande rigidez e mínimos desalinhamentos, (é desejável que não haja "stick-slip").
- Graus de: perpendicularidade, excentricidade, paralelismo, etc. ,abaixo do máximo permitido.
- Processo de usinagem isento de vibrações auto-induzidas, e em geral com as vibrações sob controle, para o que é necessário considerar: rigidez do conjunto máquina-ferramenta-peça; condições de usinagem; tipo de processo; geometria da ferramenta e, particularmente, rigidez das partes mecânicas dos acionamentos.

- Minimização dos tempos improdutivos, isto é: baixos índices de falha da máquina; minimização do tempo empregado na programação e ajuste da máquina; sistematização da forma e tipo das peças; redução no tempo de montagem e desmontagem das peças, uso de dispositivos especiais, de preferência, automáticos; rápida troca de ferramentas sem perder seus "setup".
- Redução na percentagem de peças defeituosas: em máquinas-ferramenta CNC a qualidade do produto não depende do operador.
- Etc.

### 3.2.3 ESTADO DA MÁQUINA ANTES DO RETROFITTING

Esta etapa compreende uma avaliação do conjunto da máquina antes de ser "retrofitada", com o propósito de gerar uma lista de elementos ou partes a modificar, recondicionar, eliminar ou incorporar, para assim atingir as características técnicas desejadas. Esses elementos compreendem:

**Eletrotécnica/eletromecânica:** Servo-motores, motores, sistemas de comando e de proteção dos motores, etc..

**Mecânica:** guias, fusos, mancais, acoplamentos, estruturas, flanges para os motores, agregados, etc..



Eletrônica, comando, controle: "Encoders"/escalas opto-eletrônicas, placas de interfaceamento entre máquina e CNC, controlador, amplificadores de potência, etc.

Após essa avaliação, é importante fazer uma lista detalhada dos componentes a comprar, considerando: custos, prazo de entrega e garantia de fornecimento. Já a lista dos elementos a recondicionar deve conter: custos, prazo de execução, executor do serviço, (pessoal da empresa ou terceirização), grau da garantia da qualidade do trabalho e do prazo da execução, etc.

### 3.3 DIAGRAMA LÓGICO PARA DESENVOLVER O PROJETO RETROFITTING

O diagrama do item 3.3.6, propõe uma seqüência lógica para o estudo, planejamento, e execução do projeto de atualização tecnológica de máquinas operatrizes. No item 3.2 se apresentam alguns elementos de julgamento para fazer a avaliação técnico e econômica das alternativas máquina "retrofitada" x máquina nova. A continuação se apresentam brevemente os elementos envolvidos nas etapas de : planejamento do projeto compra; planejamento do projeto serviços; execução do projeto retrofitting; testes finais e ajustes, e seguimento do desempenho da máquina em serviço.

### 3.3.1 PLANEJAMENTO DO PROJETO/COMPRAS

Essa importante atividade compreende uma análise dos diversos fornecedores, com elementos de julgamento como: preços, condições de pagamento, prazo de entrega do produto, garantia, apoio técnico, etc., (é recomendável comprar sempre o que há de mais moderno para ter vida útil mais longa). Esta atividade é importante para evitar surpresas desagradáveis, como por exemplo: elevação de preços, prazos de entrega não cumpridos ou pior ainda, o produto saiu de linha, o que poderia tornar inviável o projeto retrofitting, com as perdas maiores se o trabalho se encontra mais avançado.

### 3.3.2 PLANEJAMENTO DO PROJETO/SERVIÇOS

Em forma similar ao projeto/compras, o projeto/serviços trata de reduzir ao máximo a ingrata surpresa de deparar-se com alguma atividade necessária, mas impossível de se executar, por não contar com o equipamento e/ou a instrumentação necessária, ou com carência de pessoal adequado para sua execução. Por isso, é de fundamental importância o adequado planejamento da execução dos serviços.

Para cada serviço são elementos de análise indispensáveis os seguintes : custo, tempo de execução, instrumentação e especialistas empregados, material de consumo, relação com os outros serviços, (antes de, seguido de, paralelo a); sua

execução requer que parte da área produtiva da empresa deixe de produzir?, a máquina pode produzir enquanto se executa o serviço?, risco de se errar, etc..

### 3.3.3 EXECUÇÃO DO PROJETO "RETROFITTING"

Após o planejamento do projeto compra e do projeto serviços, se a avaliação da alternativa "retrofitar" é positiva e não existem problemas de falta de componentes e/ou especialistas, corresponde agora comprar todos os componentes planejados e executar o projeto, procurando que a máquina fique o menor tempo possível sem produzir

### 3.3.4 TESTES FINAIS E AJUSTES

Nesta etapa se pretende otimizar o funcionamento integral da máquina, de preferência a máquina fundada no lugar de trabalho. Testes típicos são:

Análise de funcionamento, tanto manual como automático; ajuste dos sistemas de acionamento (ganho, estabilidade, erro de seguimento), medição e eventual compensação, por software, dos erros de posicionamento e histerese mecânica dos carros; testes e depuração do sistema lógico de comando da máquina; usinagem de peças típicas e avaliação de sua qualidade, etc. O qual deve ser iterado até serem atingidos as metas de desempenho especificadas previamente.

### 3.3.5 ACOMPANHAMENTO DO DESEMPENHO DA MÁQUINA EM SERVIÇO

Esta etapa final do retrofitting compreende uma avaliação do estado de funcionamento da máquina "retrofitada" por algum período. Cabe destacar que, geralmente, sistemas eletrônicos falham nas primeiras horas de funcionamento, enquanto que sistemas mecânicos falham em um tempo maior. Falhas típicas poderiam ser:

**Sistemas eletrônicos:** queima de componentes por excesso

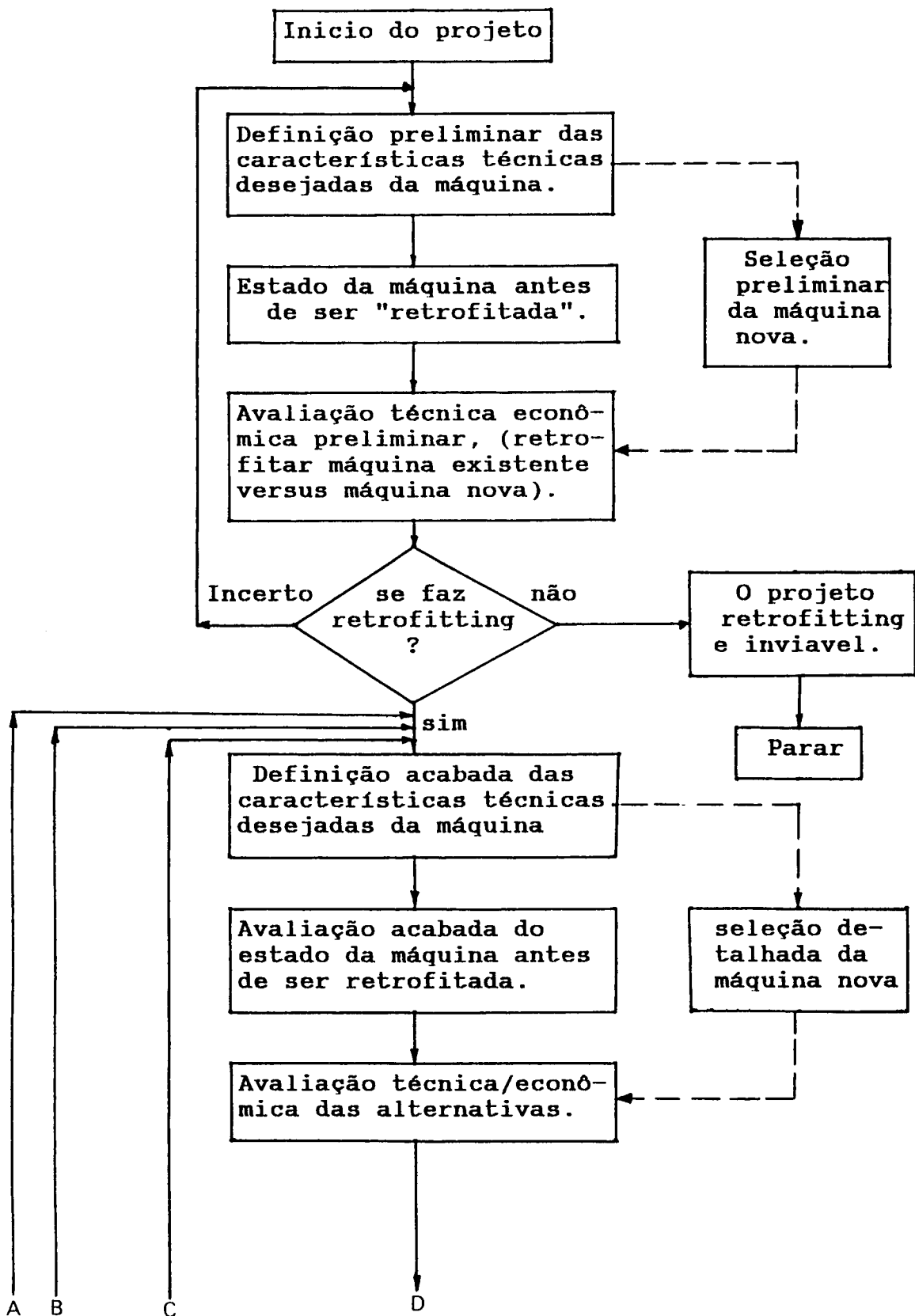
de solicitação, efeitos não considerados do ruído elétrico no local de trabalho, mau aterramento, conectores defeituosos, influência do sistema elétrico da máquina no sistema lógico por não estarem isolados, (opto-acopladores, etc), falhas do sistema lógico e/ou relés por queda de tensão ao energizar simultaneamente muitos elementos, etc.

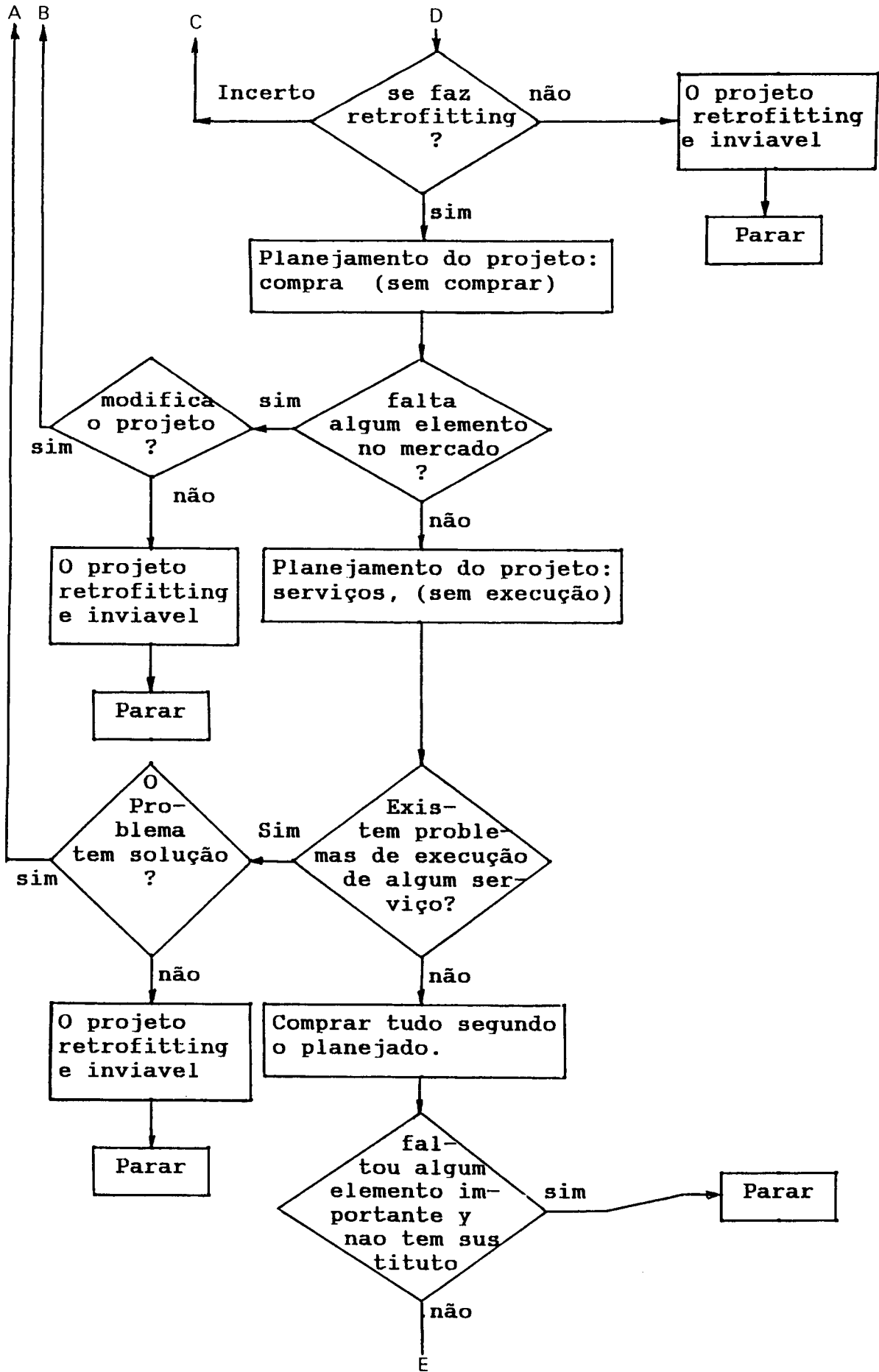
**Sistemas eletrotécnicos:** queima de motores/servomotores

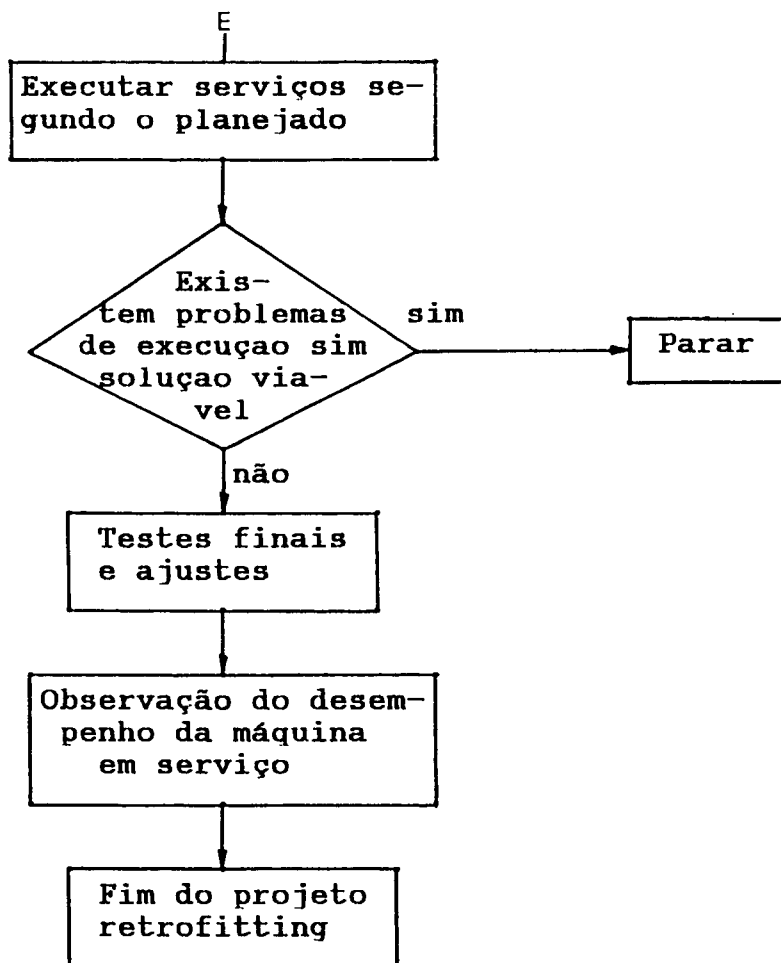
por ausência, seleção e/ou ajuste errado dos sistemas de proteção; contactores defeituosos; fusíveis inadequados; temporizadores mal calibrados; etc.

**Sistemas mecânicos:** aquecimento e desgaste das guias por má

lubrificação e/ou excesso de precarga, vibrações excessivas por falta de rigidez de flanges e/ou outros elementos de fixação, mau alinhamento, etc.







## CAPITULO 4

### 4. ATUALIZAÇÃO TECNOLÓGICA DO TORNO NC ERI-250

#### 4.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo se mostra uma síntese do trabalho de "retrofitting" aplicado ao torno NC marca CSEPEL DECATHLON, modelo ERI-250, baseado por um lado nas diretrizes dadas no capítulo 3, e por outro, na realidade local onde foi desenvolvido o projeto. Para mais detalhes sobre o trabalho realizado ver /12/, onde o leitor encontrará a documentação necessária para identificar o fluxo de sinais de comando e o fluxo de potência existentes entre as distintas unidades e/ou elementos do conjunto da máquina-ferramenta e, a documentação das placas de interfaceamento CNC-Máquina. Ademais encontra-se aí, a descrição detalhada dos distintos sistemas que compõem a máquina.

#### 4.2 AVALIAÇÃO PRELIMINAR

##### 4.2.1 CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DESEJÁVEIS DO TORNO

Dentre as aplicações do torno, pode-se destacar a sua utilização em atividade de ensino e treinamento de pessoal junto ao EMC/UFSC, isto faz necessário que a máquina tenha, além de suas funções automatizadas, um CNC mais moderno que



permita mostrar ao aluno as diversas aplicações e vantagem de uma máquina-ferramenta CNC.

#### 4.2.2 ESTADO DA MÁQUINA ANTES DA ATUALIZAÇÃO

A avaliação preliminar do estado do torno antes da atualização, permitiú verificar as seguintes características:

- a estrutura mecânica do torno é bastante rígida e com pouco desgaste nas suas partes moveis, (se considerada sua antiguidade).
- os servo-posicionadores dos eixos longitudinal e transversal em condições de funcionamento.
- as unidades de lubrificação é unidade hidráulica em bom estado.
- o motor para a troca de ferramentas funcionando.
- o motor principal, (para gerar o giro da árvore), com o eixo trancado.
- o comando numérico é obsoleto e está inoperante.

#### 4.2.3 AVALIAÇÃO TÉCNICA ECONÔMICA PRELIMINAR.

A análise de conveniência quanto à atualização do torno CSEPEL ERI-250 compreende basicamente duas alternativas:

Alternativa A: Comprar um torno CNC de produção, com um custo aproximado de US\$ 70.000,00

Alternativa B: Fazer a atualização tecnológica do torno, com um custo na faixa de US\$ 10.000,00

A alternativa "A" traria uma capacidade técnica de produção superior que a alternativa "B"; em compensação a alternativa "B" requer apenas um sétimo de inversão, com praticamente as mesmas potencialidades de processo, só que menor rapidez. Porém a alternativa de atualizar o torno é economicamente mais atrativa.

#### 4.3 AVALIAÇÃO FINAL

##### 4.3.1 CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DESEJÁVEIS DO TORNO

O torno atualizado, além de permitir as funções básicas de um torno CNC, tais como as de troca automática de ferramentas, controle contínuo das trajetórias geradas pelos carros longitudinal e transversal, troca automática de velocidades da árvore, comando sobre o sistema de fixação das peças e sensores dos sistemas de segurança da máquina. É igualmente desejável que o próprio possua um controlador com todas as vantagens dos CNC modernos, como por exemplo: tela gráfica para simular a execução da peça, que permita compensar por "software" os erros de posicionamento e as folgas, que seja possível fazer DNC, que permita a sua integração com outras máquinas CNC para formar uma FMC e alteração por "software" da performance dinâmica da malha de controle.

#### 4.3.2 AVALIAÇÃO FINAL DO ESTADO DA MÁQUINA ANTES DA ATUALIZAÇÃO

A primeira etapa da avaliação final do projeto denominado de "Atualização Tecnológica do Torno CSEPEL ERI-250" consistiu em avaliar o estado em que se encontrava a máquina no seu conjunto. Para isto foram desmontadas as unidades físicas e foi analisada em detalhe cada um dos elementos constituintes do conjunto. O resultado de tal análise pode ser resumido nas seguintes constatações:

- NC totalmente obsoleto, não funciona.
- motor principal, (da árvore), com o eixo trancado.
- sistema de mudança de velocidade da árvore em funcionamento aceitável, mas de concepção inadequada para os novos tempos; somente permite o comando discreto das RPM, (10 velocidades).
- cabos de energia e de sinais da máquina em condições de funcionamento.
- unidade de lubrificação em bom estado, só necessitando manutenção.
- unidade hidráulica em bom estado; falta manutenção.
- sem unidade de fluido de refrigeração para a usinagem.
- sistema eletro-mecânico de troca de ferramentas em bom estado, mas muito lento e com giro da torre em um só sentido.
- acionamento dos carros longitudinal "Z" e transversal "X" em estado regular; o fuso do eixo "Z" deve ser trocado devido ao desgaste no seu

extremo e particularmente por uma deformação pontual do flanco que causa um forte impacto das esferas ao passar por tal zona.

- os servomotores são de corrente contínua e trabalham de forma adequada; o amplificador de potência é tiristorizado com um tempo morto de 4 ms aproximadamente e funcionando de forma aceitável. As guias são fechadas de contato metal-teflon e com baixo desgaste.

#### 4.3.3 MODIFICAÇÕES QUE DEVERIAM SER FEITAS PARA UMA ADEQUADA ATUALIZAÇÃO DO TORNO

Baseado no estado da máquina antes do "retrofitting" e considerando o nível tecnológico atual das máquinas-ferramenta CNC, detalham-se a seguir as alterações sugeridas para obter uma adequada atualização do torno CSEPEL ERI-250.

##### O comando numérico

A necessidade de substituir o comando numérico original por outro mais moderno é irrefutável, pois o NC original além de estar fora de operação é totalmente obsoleto. A questão remanecente é, que tipo de comando deveria ser incorporado ao sistema. A solução está, em parte no item 2.4.4 e, por outra, nas necessidades que a máquina deve suprir.

Pelo visto, é recomendável empregar um CNC que possua todas as vantagens dos CNC modernos e com controle contínuo da trajetória em dois eixos, "X" e "Z" do torno, com um grau

de liberdade adicional para controlar a velocidade da árvore e que permita o comando para a troca de ferramentas. É desejável que, além disso, possua tela gráfica, que tenha interface que permita integrar o torno em célula flexível FMC e fazer DNC, que possua compensação de folgas e desgastes pela cadeia cinemática dos posicionadores, etc.

### **Sistema de acionamento da árvore**

O sistema de acionamento da árvore do torno é obsoleto, pois só permite 10 valores discretos de velocidade e a máxima velocidade é de apenas 1400 RPM. Além disso, toda a cadeia cinemática, particularmente as engrenagens para a troca de rotação, introduzem nível de vibração adicional que pode ser determinante para a não aplicação em trabalhos de uma qualidade superficial dimensional e geométrica mais exigente.

Seria desejável eliminar toda esta cadeia cinemática e conectar diretamente a árvore ao servo-motor por intermédio de uma correia sincronizadora.

### **Sistema de troca de ferramentas**

O funcionamento do sistema de troca de ferramentas original é aceitável, porém sofrendo de dois inconvenientes importantes que são: a velocidade de troca de ferramentas é baixa e o sentido de giro é unidirecional. Pelo que, para usinar com a ferramenta imediatamente anterior, o sistema deve girar  $324^\circ$ , ângulo que cairia a  $36^\circ$  se a torre pudesse girar em ambos sentidos, o que reduziria desgastes, ruídos, tempos secundários, etc.

## Posicionadores para os eixos "X" e "Z"

Os sistemas de posicionamento existentes consistem de:

- amplificador de potência tiristorizado, com tecnologia da década de 70 e com tempo morto da ordem de 4ms, (aceitável).
- servo-motores de corrente contínua com tacômetro incorporado e um tempo de resposta da ordem de 30ms empregando filtro no regulador de velocidade, para os eixos "X" e "Z", (uma troca não traria muita melhora pois a mecânica é pesada).
- "resolver", como sistema de realimentação de posição.
- acoplamento entre o eixo do servo-motor e fuso de esferas recirculantes do tipo compensador flexível.
- fusos de esferas recirculantes com passo de 10mm.
- guias de contato metal-teflon do tipo fechadas, com ajuste mecânico e sistema de lubrificação por pressão com bomba de acionamento manual.

Seria interessante pensar em modificar o tipo de guias e instalar guias de rolamentos, o que reduziria o torque necessário dos servo-motores e poderia eliminar o possível efeito "stick-slip" presente em baixas velocidades, com o problema correspondente de posicionador instável. Além disso surgiria a alternativa de avaliar a possível troca dos servo-drives/amplificador de potência.

#### 4.3.4 AVALIAÇÃO TÉCNICO ECONÓMICA FINAL

O objetivo principal do trabalho consiste em habilitar todas as funções do torno CSEPEL ERI-250 ao menor custo possível. Para tanto, foé planejado realizar alterações mínimas na máquina, com vista à di~~mi~~nuir a inversão.

A exceção à regra, da mínima inversão, foi dada pela aquisição de um CNC de última geração, marca DYNAPATH MODELO DELTA 20T. Este CNC possui as funções requeridas para automatizar tornos com a troca automática de ferramenta. Além de ser o CNC adequado para a máquina, sua aquisição permite ao EMC/UFSC contar com um CNC moderno, que potencializa o desenvolvimento de outros projetos. Exemplo: dispor de um CNC com toda a informação, (/09/), para possíveis aplicações de "retrofitting" para fins didáticos; permite compor um sistema DNC; permite habilitar o CNC para comando remoto, podendo se integrá-lo à outras máquinas para formar uma célula de manufatura flexível (FMC). O valor aproximado no gasto na aquisição do CNC está na faixa de US\$ 10.000,00

Os custos adicionais envolvidos no projeto de atualização corresponde à ad~~qui~~sição dos seguintes itens: dois "encoders", óleo de lubrificação e óleo hidráulico, compoentes TTL, pintura, fios de sinais, entre outros. Com um custo aproximado de US\$ 500,00.

Assim, a alternativa de atualizar o torno oferece um custo na faixa de sete vezes menor que um torno CNC novo de características similares.

A aplicação do torno CNC está orientada principalmente a cobrir as necessidades docentes de laboratórios e experimentação do EMC/UFSC, pelo que, o parâmetro de rapidez de execução e redução dos tempos improdutivos são de menor relevância. Além disso, o CNC Dynapath Delta 20-T oferece todas os confortos dos comandos modernos, /9/.

#### 4.4 DESCRIÇÃO DO TRABALHO DESENVOLVIDO

A figura 4.1 mostra o Layout físico do torno, onde:

- GABINETE 1:** Esta unidade física é composta pelos elementos de comando e proteção dos distintos motores da máquina, transformadores, contadores, retificadores de tensão, relés, temporizador, etc.
- GABINETE 2:** Contém o amplificador de potência tiristorizado marca BOSCH.
- GABINETE 3:** Neste gabinete se encontra o CNC, DYNAPATH DELTA-CNC T20 e as placas de interfaceamento CNC-Máquina, especialmente desenvolvidas.



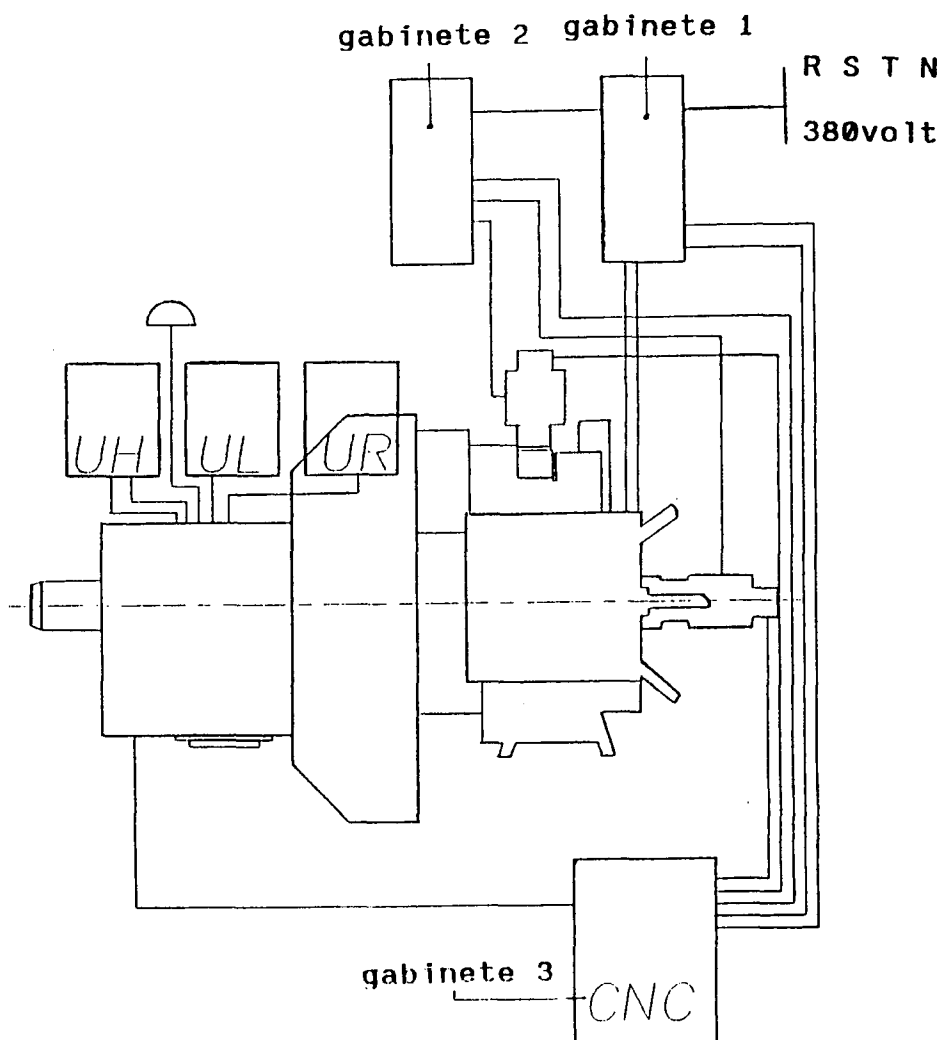


Figura 4.1      Layout físico do conjunto da máquina, CNC, gabinetes e cabos de conexão onde: UH unidade hidráulica, UL unidade de lubrificação, e UR unidade de refrigeração.

A figura 4.2 permite ver com mais detalhes a máquina propriamente tal, particularmente os motores:

- MF :      motor principal.
- MT :      motor para a unidade hidráulica.
- MO :      motor para a unidade de lubrificação

- MHV : motor para a unidade de refrigeração.
- MRF : motor para acionar a troca de ferramentas.
- MEX : servo-motor do carro transversal "X" com tacômetro e encoder incorporado.
- MEZ : servo-motor do carro longitudinal "Z" com tacômetro e encoder incorporado.

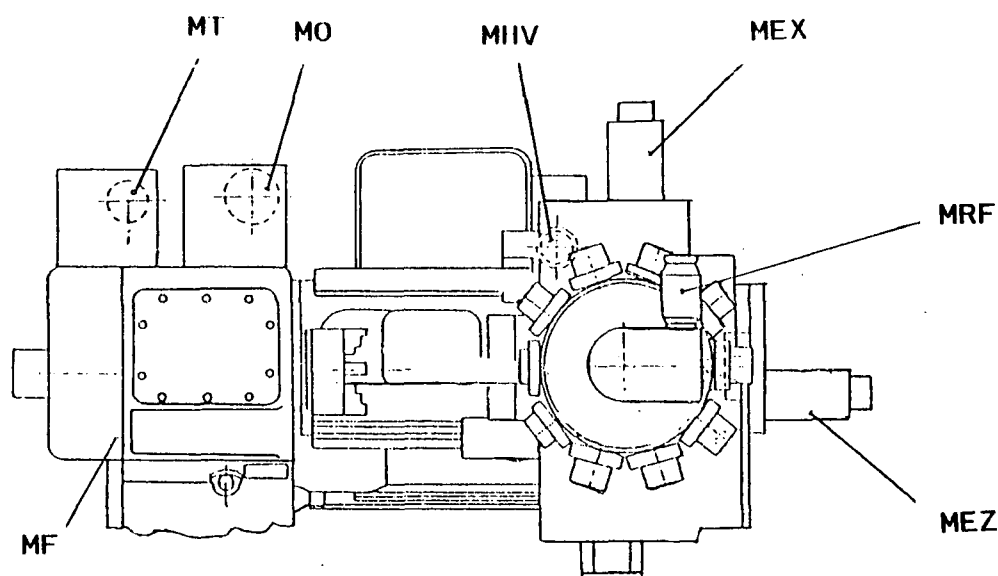


Figura 4.2 Esquema do torno CSEPEL ERI - 250.

### Sistema de acionamento da árvore

O sistema de acionamento da árvore não sofreu modificação conceitual de importância relevante, por se considerar muito oneroso adquirir um sistema de servo-acionamento para controle contínuo da RPM. Segue-se uma breve descrição do sistema implementado.

O sistema de acionamento da árvore é constituído por:

- motor trifásico em ligação tipo Dalhander reversível, de duas velocidades, segundo o tipo de conexão selecionada.
- transmissão por correia em "V" desde o eixo do motor ao eixo de entrada do sistema de transmissão por engrenagens.
- sistema de transmissão por engrenagens composto por quatro eixos e seis pares de engrenagens, das quais, três devem trabalhar de forma ativa. Isto é comandado por seis embreagens e uma alavanca de ação manual. Ver figura 4.3.

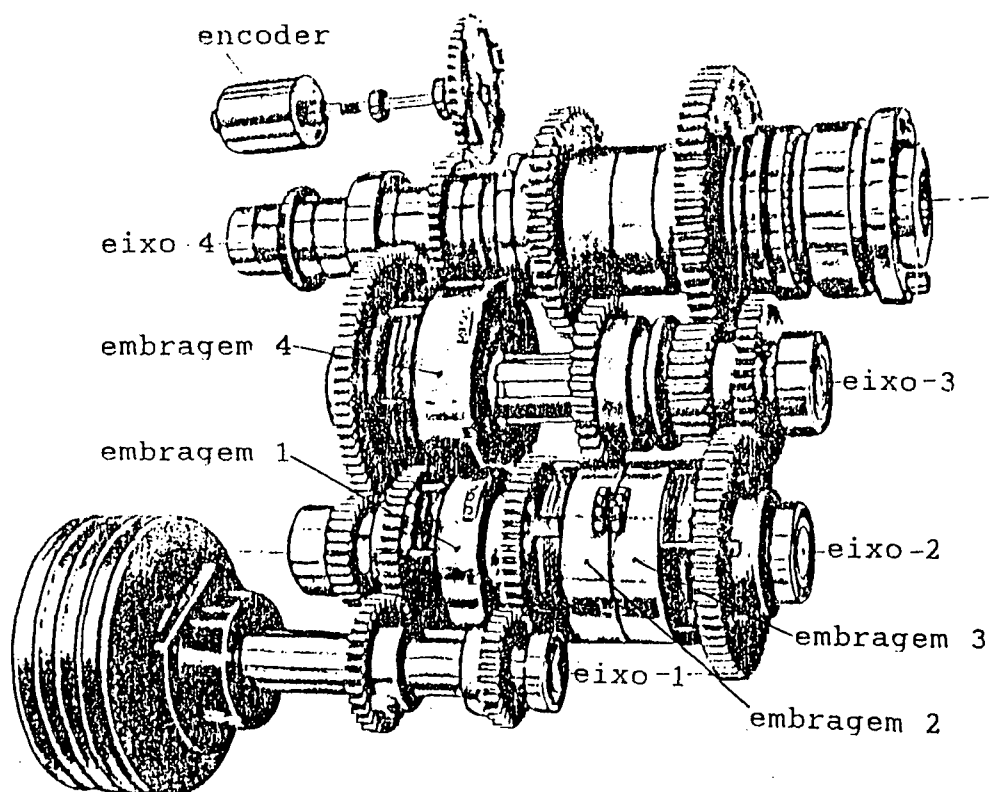


Figura 4.3 Cadeia cinemática para as RPM da árvore.

Portanto, mudando o tipo de conexão do motor, as embreagens e a alavanca manual, pode-se comandar as 10 possíveis RPM da árvore em duas faixas: (63, 90, 125, 180, 250, 355, 500 e 710 RPM) e (125, 180, 250, 355, 500, 710, 1000, e 1400 RPM) cada.

Para poder comandar o sistema antes descrito foi necessário desenvolver uma placa de interface CNC-Torno, que permitisse selecionar das 10 RPM possíveis, a mais adequada segundo o solicitado pelo programa NC. Ver /12/.

#### **Sistema de comando para a troca de ferramentas**

O sistema eletro-mecânico da torre porta-ferramenta não foi modificado, mas o sistema de comando foi necessariamente modificado para que, dada uma ordem de troca de ferramenta pelo CNC, o sistema executasse a ordem solicitada. Isto foi implementado por meio de uma placa de interface que atua como decodificadora entre o CNC e o sistema de câmbio de ferramenta /12/.

#### **Sistema de acionamento dos carros longitudinal "Z" e transversal "X"**

Do sistema de acionamento original foi extraído o resolver compatível com o antigo NC, e em seu lugar se instalou um encoder compatível com o novo CNC. Cabe destacar que foi necessário projetar e fabricar a estrutura e eixo suporte dos encoder "X" e "Z", pois foram empregados encoder

tipo "KIT" de Hewlett Packard /12/. Por outro lado, foi também necessário incorporar um filtro regulador de velocidade com objetivo de melhorar a resposta dinâmica dos servo-acionamentos, particularmente para elevar o coeficiente de amortecimento e, conseqüentemente reduzir a sobrepassagem. Resultou um sistema de acionamento sem oscilações (super-amortecido) e um tempo de resposta na ordem de 30 ms (ver capítulo 5).

#### 4.5 ATIVIDADES NÃO REALIZADAS

Como em toda execução de projetos se deve conjugar o tempo de execução e os meios com que se conta com o grau de otimização do trabalho desenvolvido. Neste contexto, além das modificações sugeridas no item (4.3.3) e não possíveis de desenvolver devido a limitações econômicas, ficaram faltando atividades inerentes à avaliação do trabalho desenvolvido como por exemplo:

- instalar um sistema de alarme e bloqueio da árvore quando a pressão da unidade hidráulica cair por enbaixo de um valor pre-fixado.
- fixação da máquina ao solo e nessas condições realizar ensaios de usinagem.
- usar peças típicas, como por exemplo: cilindro, cone e esferas para submete-las posteriormente a um cuidadoso controle dimensional e geométrico para, de tais resultados, poder avaliar o grau de qualidade da máquina-ferramenta.

- medir o erro de posicionamento ao longo dos eixos "X" e "Z", como também as folgas e/ou histerese mecânica. Dados que, incorporados adequadamente ao CNC, permitem compensar os erros de posicionamento. /09/.
- realizar a manutenção das unidades hidráulicas e de lubrificação.
- comprar e conectar ao sistema de comando já implementado, a unidade de refrigeração.
- fazer um acompanhamento por um tempo conveniente (1 a 3 meses), para avaliar o funcionamento das distintas funções implementadas.

## CAPITULO 5

### 5. ENSAIOS DINÂMICOS DOS SISTEMAS DE POSICIONAMENTO DO TORNO

#### 5.1 INTRODUÇÃO

Uma vez finalizada a implementação do sistema proposto, (ver capítulo 4 e /12/), procedeu-se à qualificação do comportamento dinâmico dos sistemas de posicionamento dos eixo "X" e "Z" do torno CSEPEL ERI-250, procurando alcançar especificações típicas para esta aplicação. Neste capítulo se apresenta o desenvolvimento da parte experimental referente à otimização do circuito regulador de velocidade e os ensaios dinâmicos onde foram verificados os seguintes itens:

- Resposta ao degrau na malha de regulação da velocidade.
- Resposta em frequência na malha de regulação da velocidade.

## 5.2 CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DOS SISTEMAS DE MEDIÇÃO EMPREGADOS NOS ENSAIOS

Para a realização dos ensaios dinâmicos dos sistemas de acionamento foram utilizados, além dos componentes próprios da máquina, os seguintes equipamentos e sistemas de medição.

- Analisador de sistemas de controle CSA

Fabricante : HEWLETT PACKARD

Modelo : 3524 A

Precisão :  $\pm 2 \%$

Frequência : 100 KHZ

- Osciloscópio

Fabricante : TEKTRONIX

Modelo : 2230 Digital STORAGE

Precisão :  $\pm 2 \%$

Frequência : 100 MHZ



### 5.3 ENSAIOS REALIZADOS PARA O AJUSTE DO FILTRO REGULADOR DE VELOCIDADE

Devido à ausência do filtro regulador de velocidade nos posicionadores originais, foi necessário implementar o circuito indicado na figura 5.1, onde:

$V_c$	=	Tensão de comando ou entrada.
$V_{tg}$	=	Tensão do taco-gerador (realimentação).
$V_s$	=	Tensão de comando do amplificador de potência.
$R_t$ e $C_t$	=	Resistência e capacitância para filtrar o sinal $V_{tg}$ .
$R_l$ e $C_l$	=	Resistência e capacitância para definir a ação integral do filtro regulador.
$R_c$ e $R_{tg}$	=	Resistências principais para os sinais $V_c$ e $V_{tg}$ respectivamente.
$C_2$	=	Capacitância para reduzir os picos de $V_s$ .
$R_3$	=	Resistência que define a parte proporcional do filtro.
$D_z$	=	Diodos "Zener" $\pm 10$ volts, encarregados de limitar a tensão de saída em $- 10$ volts < $V_S$ < $+10$ volts

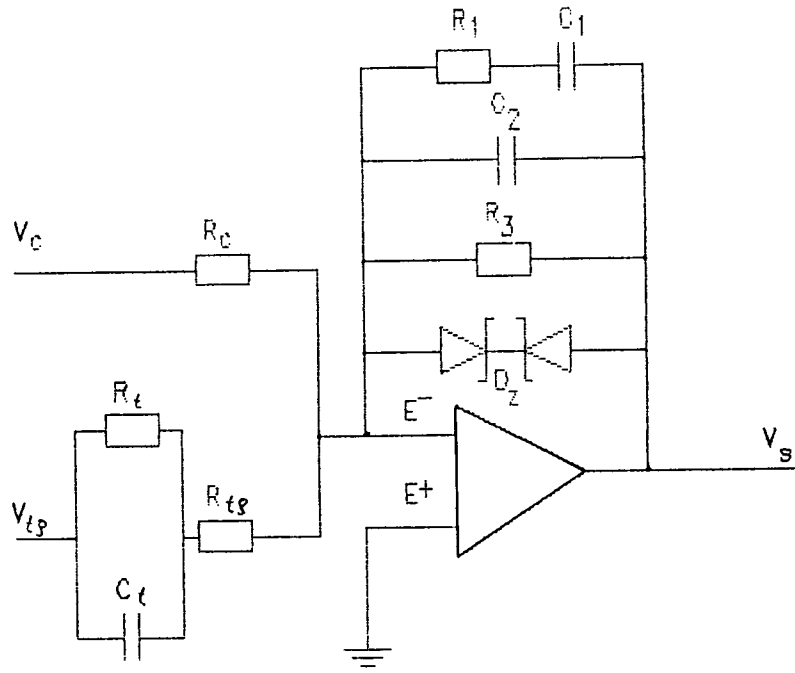


Figura 5.1 Filtro regulador de velocidade implementado nos servo-posicionadores dos eixo X e Z.

Com o circuito implementado e alterando adequadamente os componentes, se pode gerar um filtro proporcional (P), proporcional integral (PI) ou proporcional integral derivativo (PID).

Na regulação do circuito, existe a dificuldade de não poder determinar com exatidão o limite de estabilidade. Em acionamentos elétricos isto é primordial, já que uma oscilação na etapa de aceleração ou de freagem pode provocar uma sobrecarga desnecessária nos sistemas de segurança do acionador elétrico.

Para otimizar o filtro regulador de velocidade, é necessário observar a tensão do taco-gerador " $V_{tg}$ " ou a tensão de saída do filtro regulador " $V_s$ ". Foi analisada a tensão " $V_{tg}$ " e, combinando valores dos componentes do circuito, usando um método de aproximações sucessivas, chegou-se aos valores indicados na tabela 5.1, que definem uma resposta dinâmica aceitável do posicionador, considerando as características dos posicionadores do torno.

Tabela 5.1      Valores dos componentes que formam o filtro regulador da velocidade dos eixo "X" e "Z".

	$R_t$ K $\Omega$	$C_t$ mF	$R_c$ K $\Omega$	$R_{tg}$ K $\Omega$	$R_l$ K $\Omega$	$C_l$ mF	$R_3$ K $\Omega$	$C_2$ mF
eixo X	0	--	18	15	85	1.4	--	--
eixo Z	0	--	18	15	18	2.4	--	--

A figura 5.2 mostra um esquema da montagem empregado para realizar os ensaios que permitiram definir o filtro regulador de velocidade para cada eixo. Com esta montagem aplicou-se uma tensão do tipo degrau na entrada de comando " $V_c$ ", a qual provoca uma resposta do sistema verificável na tensão gerada pelo taco-gerador " $V_{tg}$ ".

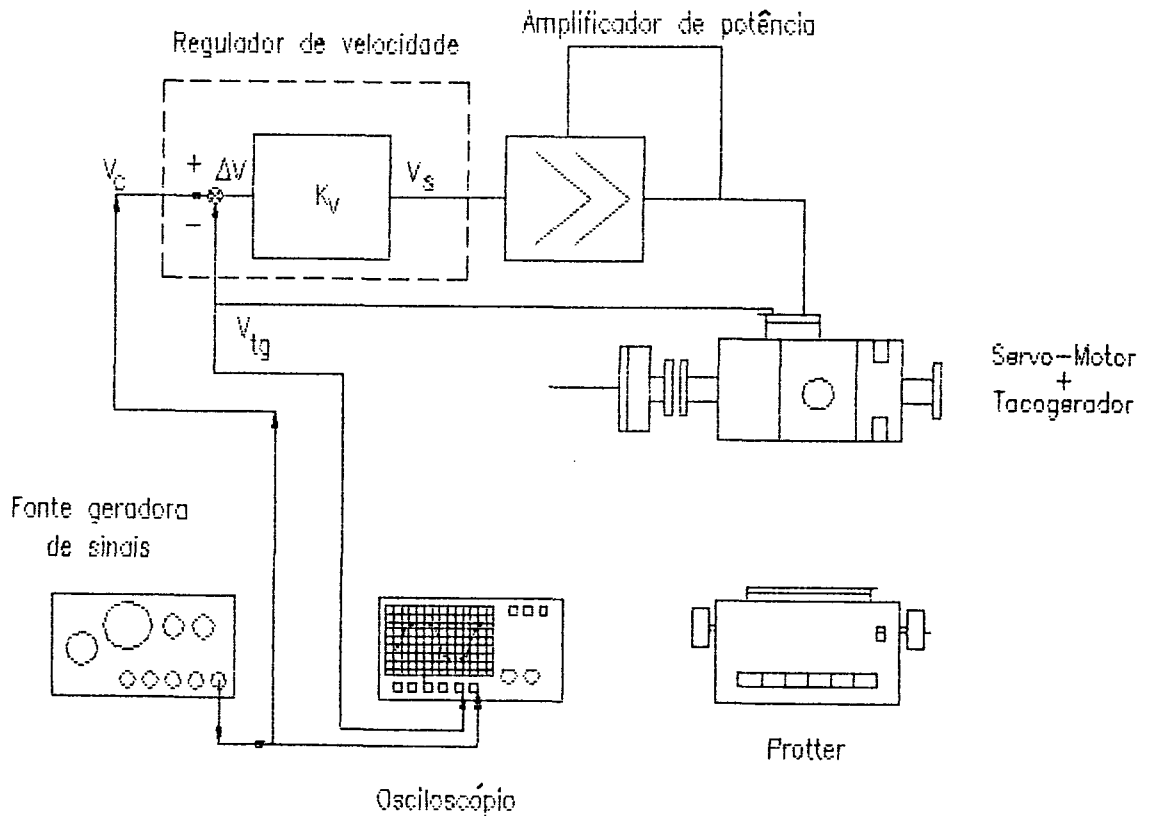
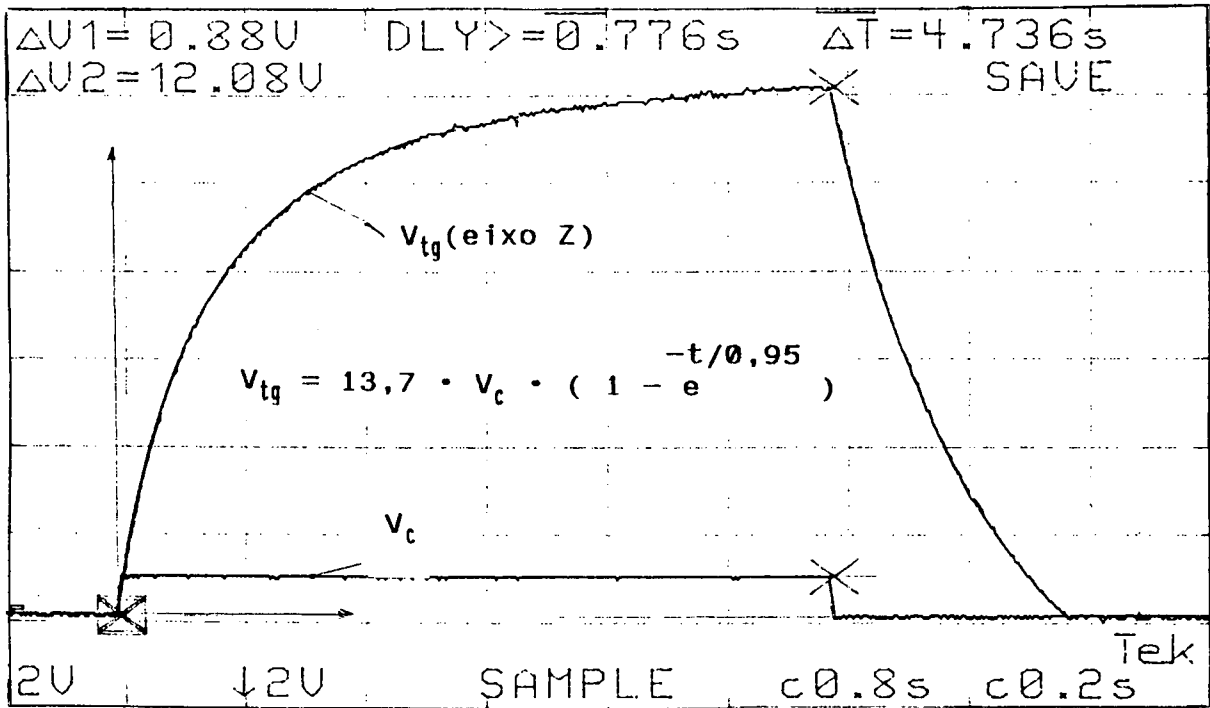


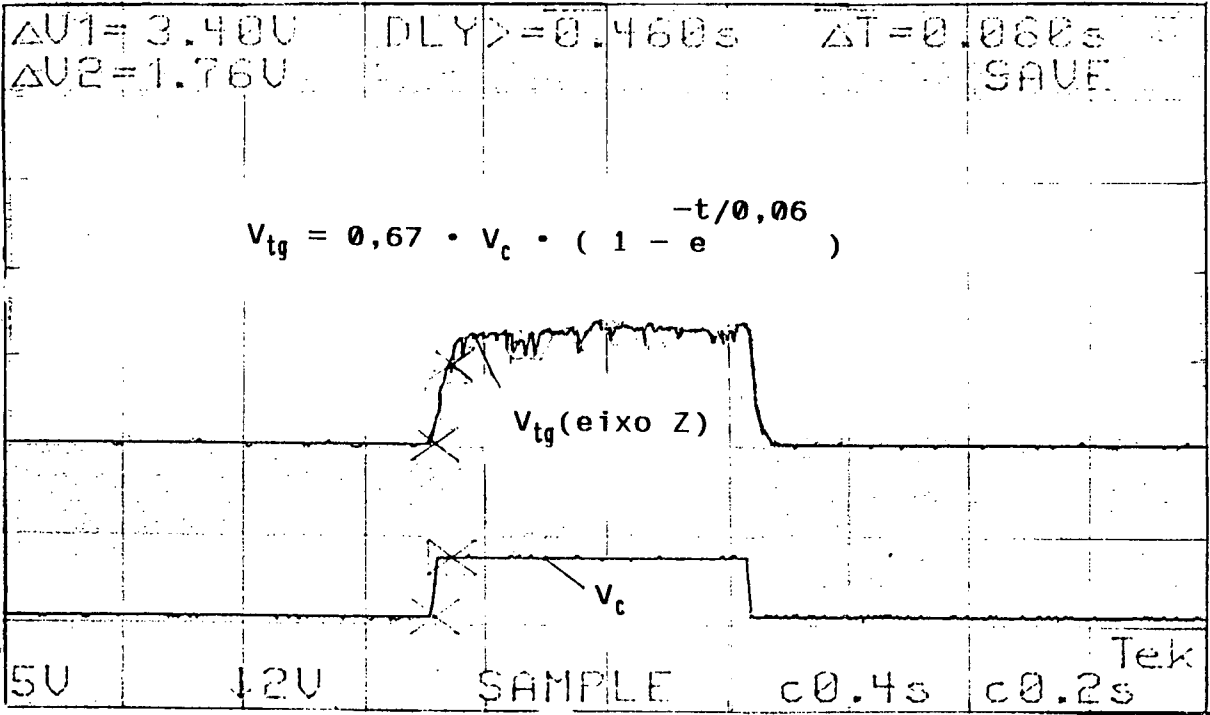
Figura 5.2 Montagem do sistema de ensaio para a otimização do filtro regulador de velocidade.

Seria um exagero expor aqui a série de gráficos realizados para chegar à melhor resposta dinâmica do servo-acionamento. Em caráter expositivo mostram-se alguns deles nas figuras 5.3 e 5.4.





Caso A: Sem filtro regulador de velocidade.



Caso B: Com filtro regulador de velocidade.

Figura 5.4 Resposta ao degrau no tempo do servo-acionamento do eixo "Z".

#### 5.4. RESPOSTA NO DOMÍNIO TEMPO DO SISTEMA A UMA EXCITAÇÃO DO TIPO DEGRAU

Aplicando-se um degrau como fonte de excitação ao sistema, (sinal  $V_c$ ), e analisando sua resposta temporal, (sinal  $V_{tg}$ ), é possível avaliar-se os seguintes parâmetros.

- Tempo de resposta
- Sobre-passagem
- Tempo morto

As figuras 5.5 e 5.6 mostram um esquema da montagem empregada para fazer os ensaios temporais dos servo-acionamentos do torno CSEPEL ERI-250. O analisador de sistemas de controle CSA utilizado, possui entre outros, os canais "A" e "B" empregados para medir os sinais a analisar, (tensão de comando " $V_c$ " ou " $V_s$ " tomado no canal "A" e tensão do taco-gerador " $V_{tg}$ " tomado no canal "B" ), e o canal "output" empregado para excitar o sistema a analisar /08/.

Com objetivo de melhor conhecer o grau de influência do filtro regulador de velocidade e do sistema de transmissão mecânica no comportamento dinâmico dos servo-acionamentos, os ensaios temporais foram realizados nas seguintes condições, ver figuras 5.5 e 5.6.

- A : Sem acoplamento flexível e sem filtro regulador.  
 B : Com acoplamento flexível e sem filtro regulador.  
 C : Sem acoplamento flexível e com filtro regulador.  
 D : Com acoplamento flexível e com filtro regulador.

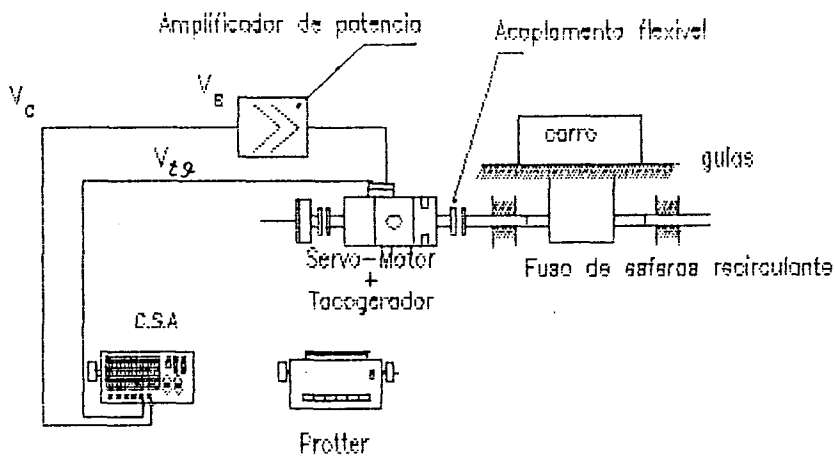


Fig. 5.5 Esquema da montagem para ensaio temporal sem filtro regulador , casos "A" e "B".

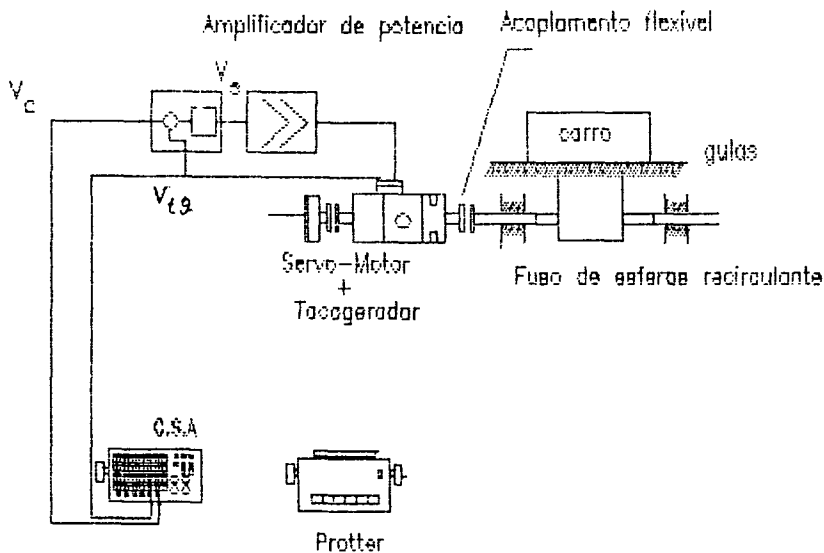


Fig. 5.6 Esquema de montagem para ensaio temporal com filtro regulador, casos "C" e "D".



As figuras 5.7 a 5.10 mostram a resposta no tempo, ante uma função de excitação do tipo degrau do servo-acionamento do eixo "X". As series "a" mostram a resposta no tempo do servo-acionamento, e as series "b" mostram um detalhe do inicio da função degrau, permitindo visualizar melhor o tempo morto.

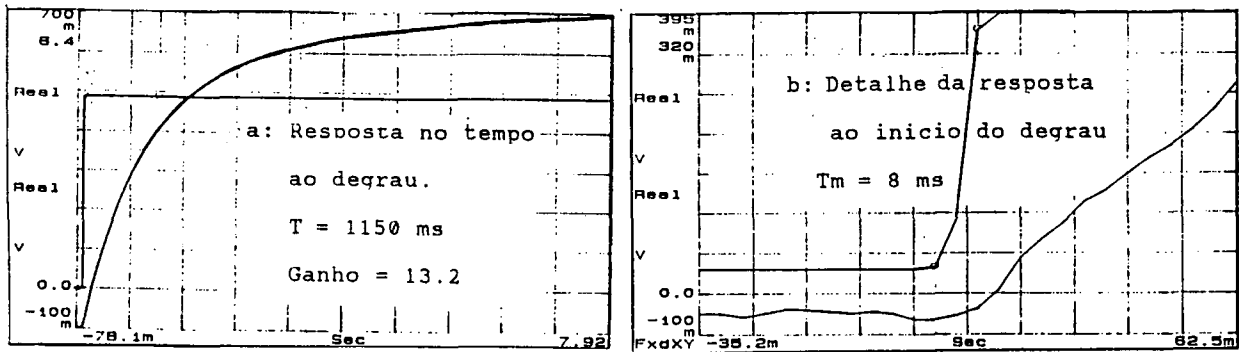


Figura 5.7 Resposta no tempo ao degrau do servo-acionamento do eixo X; SEM acoplamento flexível e SEM filtro regulador de velocidade.

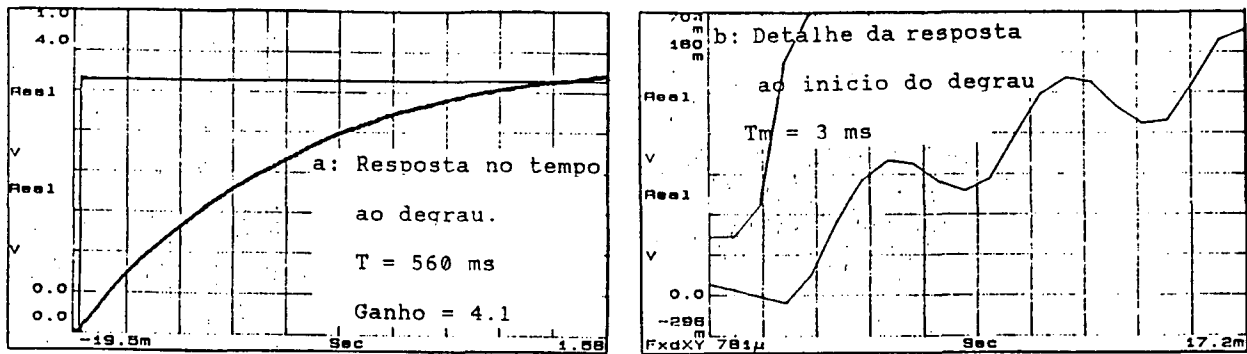


Figura 5.8 Resposta no tempo ao degrau do servo-acionamento do eixo X; COM acoplamento flexível e SEM filtro regulador de velocidade.

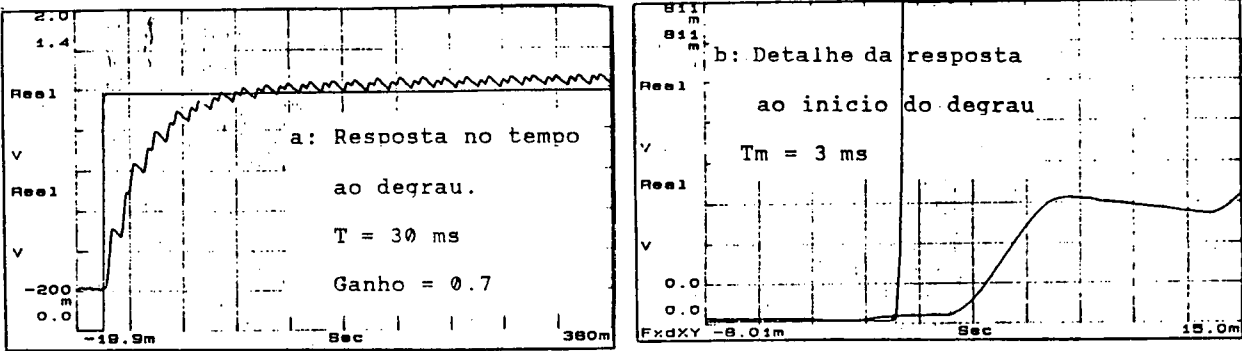


Figura 5.9 Resposta no tempo ao degrau do servo-acionamento do eixo X; SEM acoplamento flexível e COM filtro regulador de velocidade.

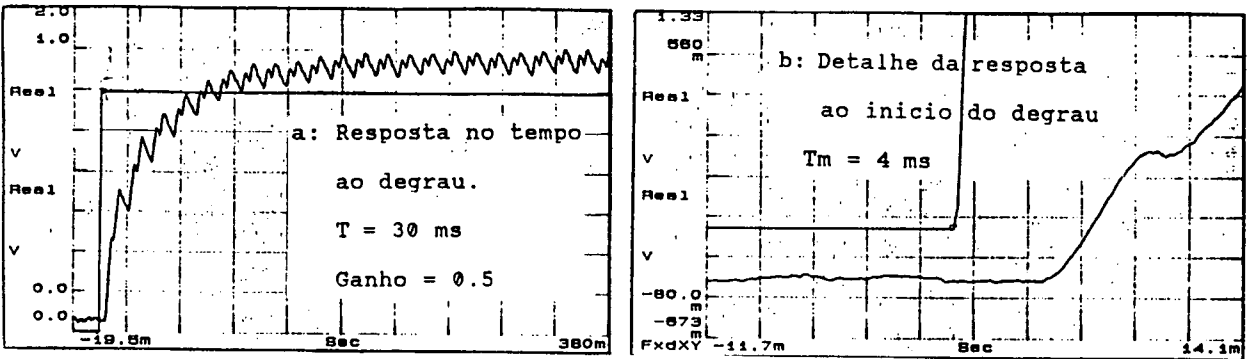


Figura 5.10 Resposta no tempo ao degrau do servo-acionamento do eixo X; COM acoplamento flexível e COM filtro regulador de velocidade.

Analogamente ao eixo "X", as figuras 5.11 a 5.14 mostram a resposta no tempo, ante uma função de excitação do tipo degrau do servo-acionamento do eixo "Z".

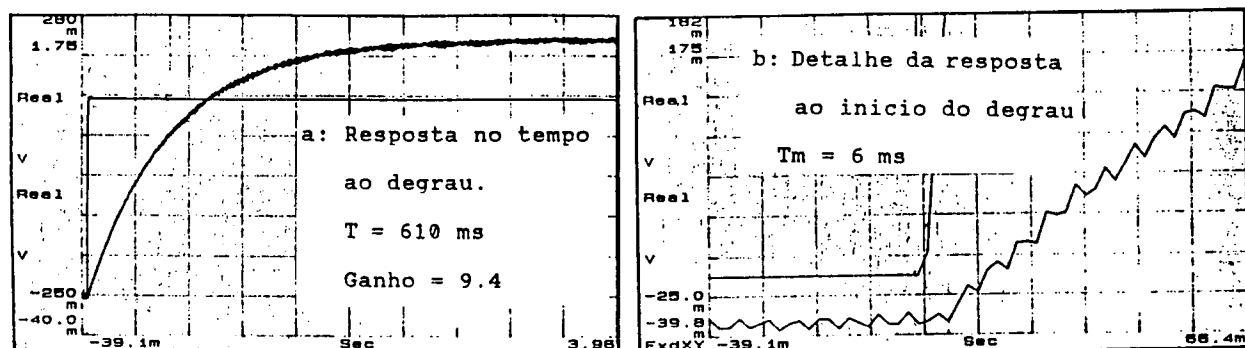


Figura 5.11 Resposta no tempo ao degrau do servo-acionamento do eixo Z; SEM acoplamento flexível e SEM filtro regulador de velocidade.

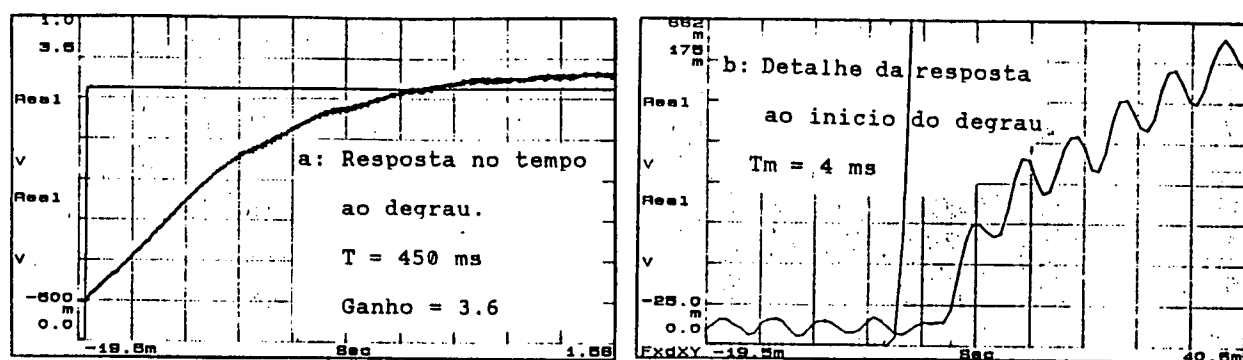


Figura 5.12 Resposta no tempo ao degrau do servo-acionamento do eixo Z; COM acoplamento flexível e SEM filtro regulador de velocidade.

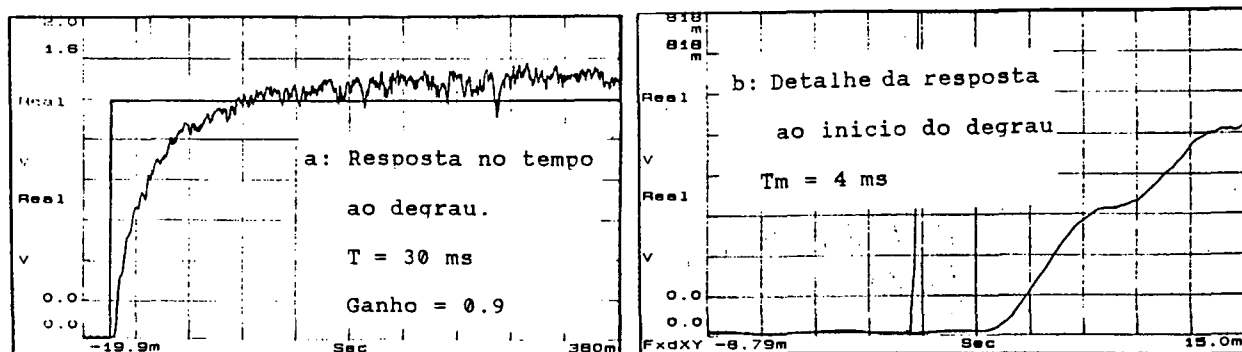


Figura 5.13 Resposta no tempo ao degrau do servo-acionamento do eixo Z; SEM acoplamento flexível e COM filtro regulador de velocidade.

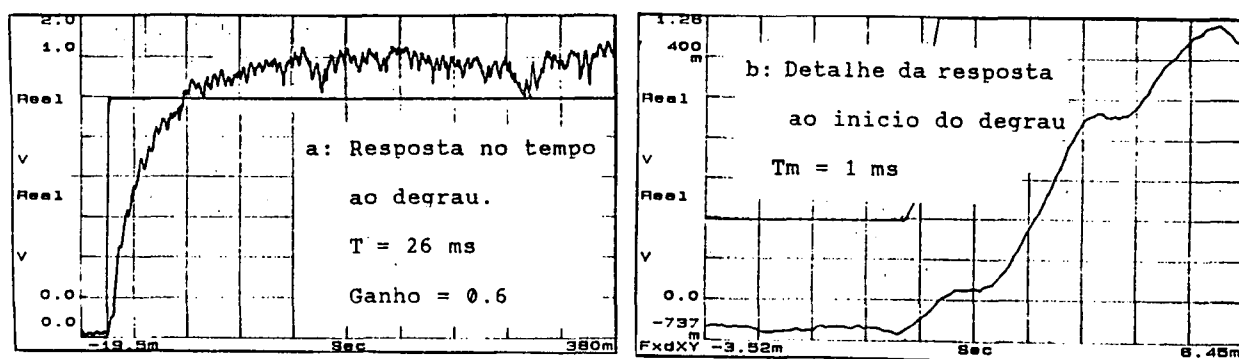


Figura 5.14 Resposta no tempo ao degrau do servo-acionamento do eixo Z; COM acoplamento flexível e COM filtro regulador de velocidade.

Baseado na resposta temporal obtida, avaliaram-se os parâmetros típicos para a resposta dada. Esses são: Tempo de resposta " $T$ ", fator de ganho " $K_v$ ", sobrepassagem " $S_p$ ", tempo morto " $T_m$ " e riple ou ondulação " $R$ ", valores que são resumidos na tabela 5.2.

Tabela 5.2      Resumo dos parâmetros do sistema, obtidos com base nos ensaios temporais dos servo-acionamentos "X" e "Z", ( $T$  : tempo de resposta,  $K_v$ : ganho,  $S_p$ : sobrepassagem,  $T_m$ : tempo morto,  $R$ : riple).

eixo	caso	figura Nº	$T$ ms	$K_v$	$S_p$ %	$T_m$ ms	$R$ %
X	a	5.7	1150	13,2	0	8	0,8
X	b	5.9	30	0,7	0	3	5
X	c	5.8	560	4,1	0	3	0,9
X	d	5.10	30	0,5	0	4	7,5
Z	a	5.11	610	9,4	0	6	1,9
Z	b	5.13	30	0,9	0	4	10
Z	c	5.12	450	3,6	0	4	2,1
Z	d	5.14	26	0,6	0	1	11

## 5.5 RESPOSTA EM FREQUÊNCIA DOS SERVO-ACIONAMENTOS DOS EIXO "X", "Z"

O diagrama de Bode gerado no ensaio frequencial, entrega as mais importantes informações do comportamento dinâmico do sistema ensaiado. Com a ajuda deste diagrama é possível analisar:

- tipo de comportamento do sistema.
- polos e zeros da função transferência.
- frequência natural " $\omega_0$ " e coeficiente de amortecimento "D", para o caso de sistemas de segunda ordem.

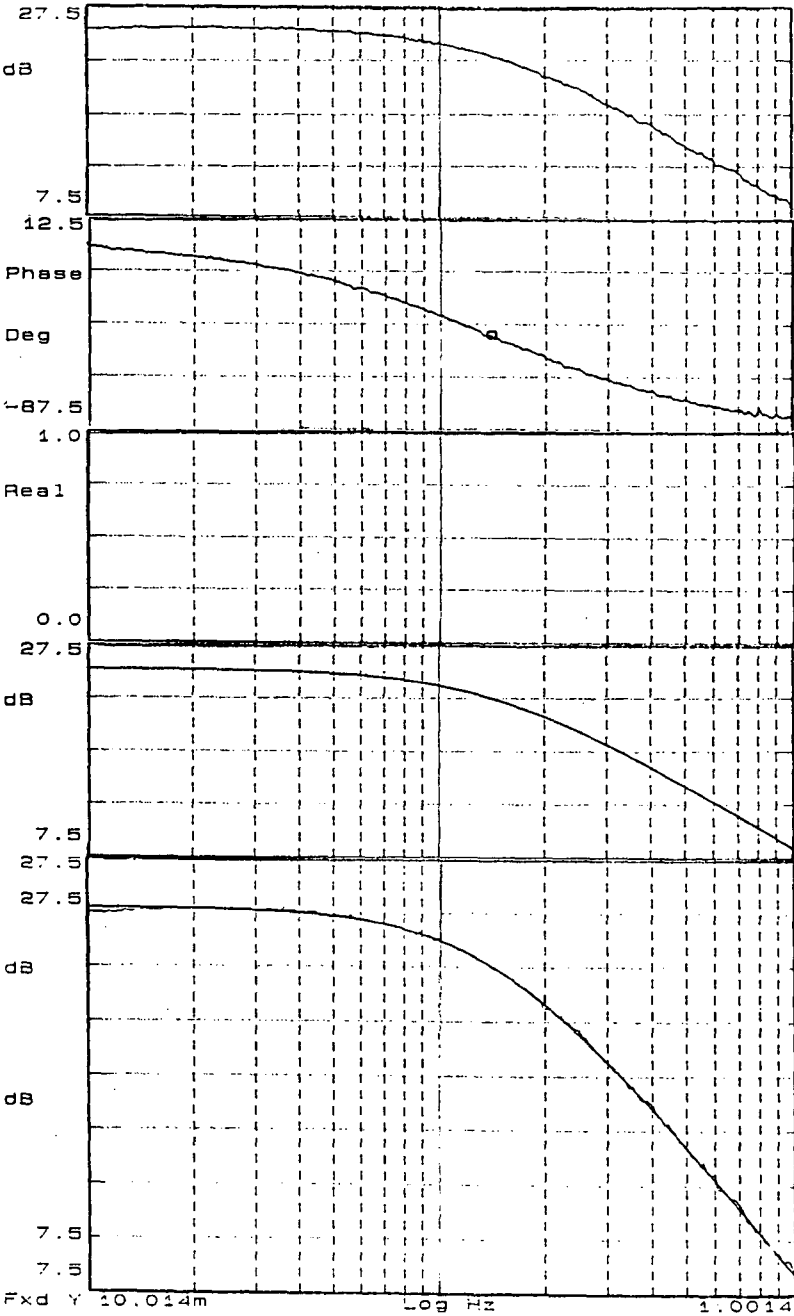
Para fazer o ensaio de resposta em frequência dos servo-acionamentos, se utilizou uma montagem como a mostrada nas figuras 5.5 e 5.6 e o CSA programado para fazer o ensaio de resposta em frequência. Usando a fonte de excitação senoidal gerado pelo próprio CSA, procederam-se os ensaios correspondentes para as seguintes configurações.

- i = Sem acoplamento e sem filtro regulador;
- ii = Sem acoplamento e com filtro regulador;
- iii = Com acoplamento e com filtro regulador.

Cabe notar que a configuração do servo-acionamento sem filtro regulador de velocidade e com acoplamento, não foi possível realizar o ensaio de resposta em frequência, devido a que o deslocamento dos carros requerido pelo ensaio era maior que o deslocamento permitido pela máquina. Embora, o ensaio realmente importante é com filtro regulador de velocidade, já que é esta a situação normal de trabalho.

As figuras 5.15 a 5.17 mostram a resposta em frequência obtida no servo-acionamento do eixo "X" e as figuras 18 a 20 correspondem à resposta em frequência do eixo "Z".

Cada figura está composta de seis gráficos: o gráfico "a" mostra o diagrama de Bode para a amplitude; o gráfico "b" mostra o diagrama de Bode para a fase; o gráfico "c" mostra a curva de coerência do ensaio; o gráfico "d" mostra a curva "FIT", que representa a melhor curva teórica calculada pelo próprio CSA; o gráfico "e" mostra a superposição da resposta em frequência para a amplitude e a curva "FIT" e finalmente o gráfico "f" mostra os pólos e zeros da curva FIT.



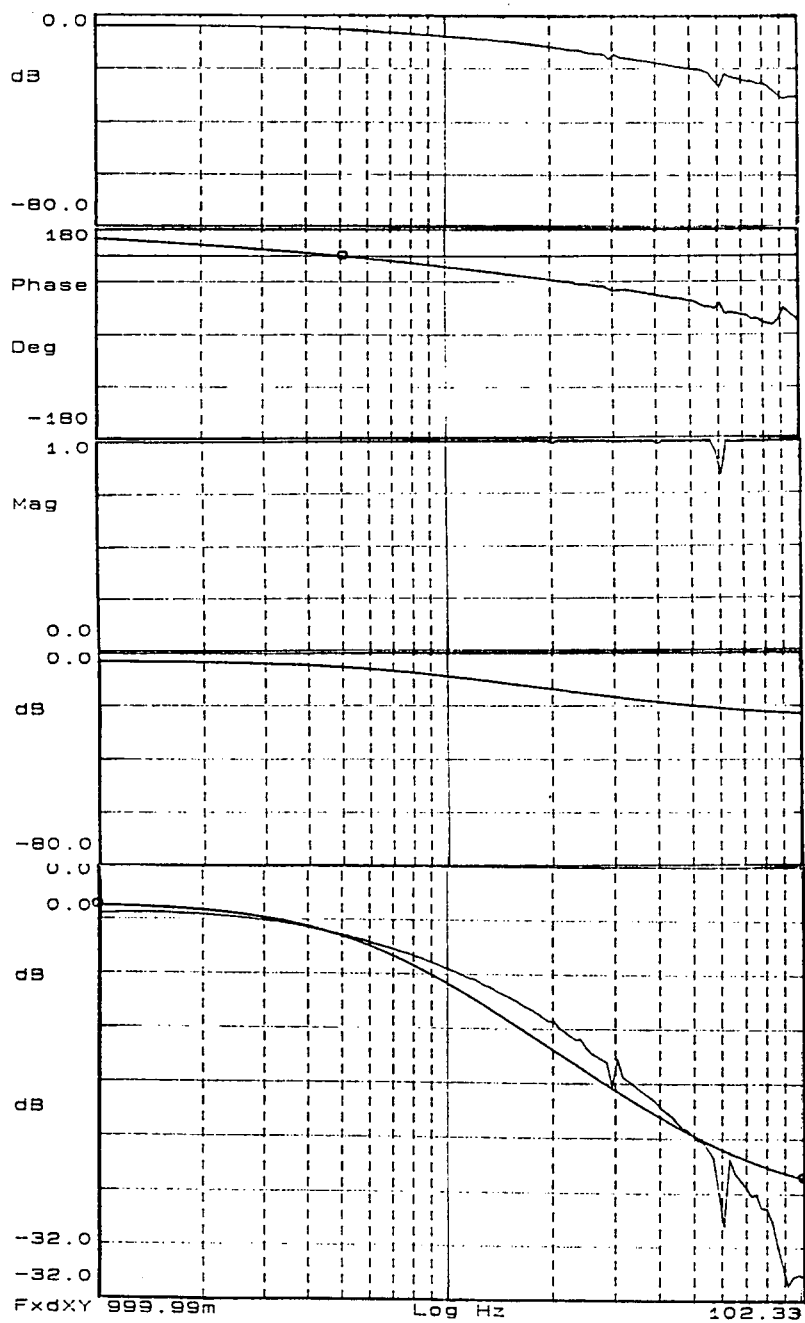
- a.- Diagrama de Bode para a amplitude.  
 $f_c = 142,3 \text{ Hz.}$
- b.- Diagrama de Bode para a fase.
- c.- Curva de coerência do teste.
- d.- Curva FIT calculada pelo CSA.
- e.- Superposição da curva FIT e da curva de resposta em frequência.

S Curve Fit			
POLES		ZEROS	
1	-122.975m ± j 10.8497m		
2			
Time delay= 0.0 S		Gain= -35.7032m	
Scale Frequency= 1.0			

- f.- Polos e zeros da função transferência

Figura 5.15 Resposta em frequência do servo-acionamento do eixo X para o caso de: SEM acoplamento e SEM filtro regulador de velocidade.



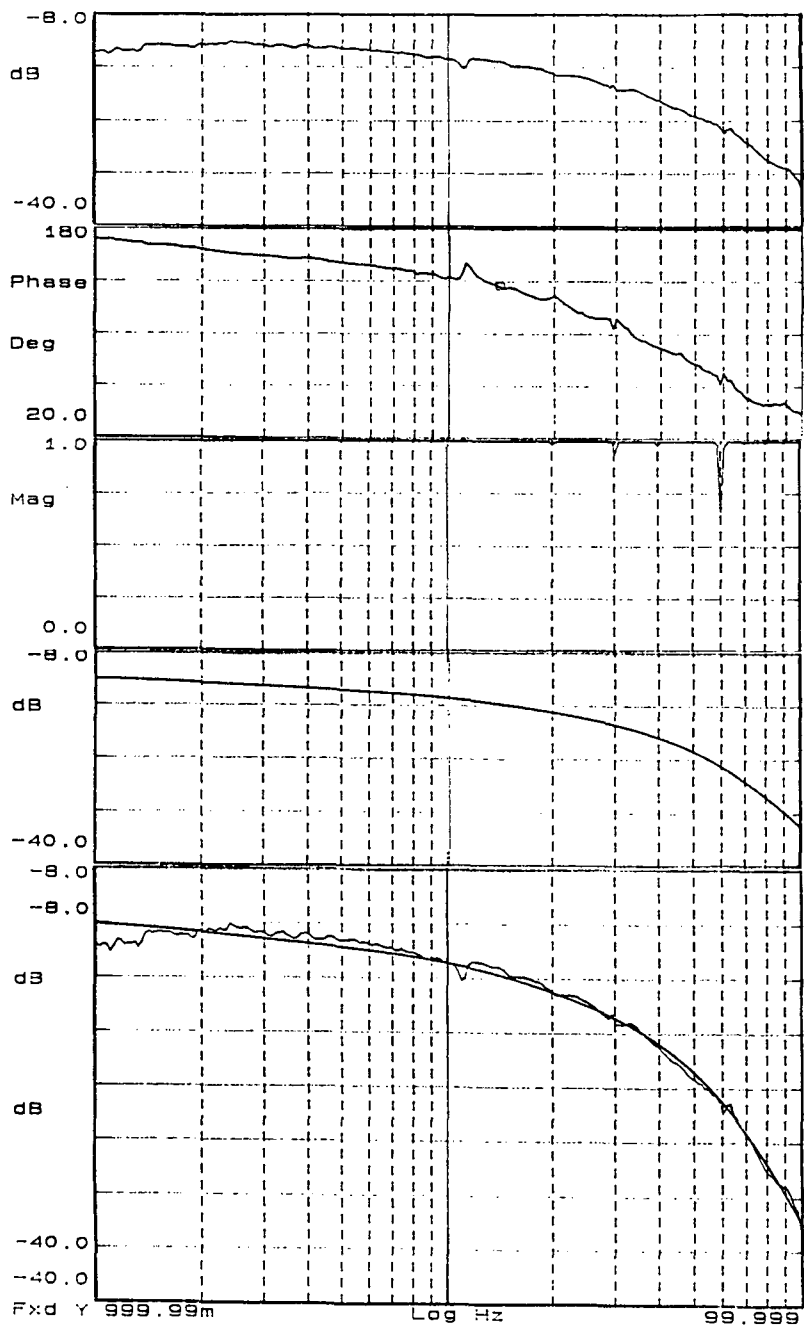


- a.- Diagrama de Bode para a amplitude.  
 $f_c = 20$  Hz.
- b.- Diagrama de Bode para a fase.
- c.- Curva de coerência do teste.
- d.- Curva FIT calculada pelo CSA.
- e.- Superposição da curva FIT e da curva de resposta em frequência.

S Curve Fit			
POLES		ZEROS	
1	-5.98405	72.1228	3
Time delay= 0.0 S		Gain= 58.7926m	
Scale Frequency= 1.0			

- f.- Polos e zeros da função transferência

Figura 5.16 Resposta em frequência do servo-acionamento do eixo X para o caso de:SEM acoplamento e COM filtro regulador de velocidade.

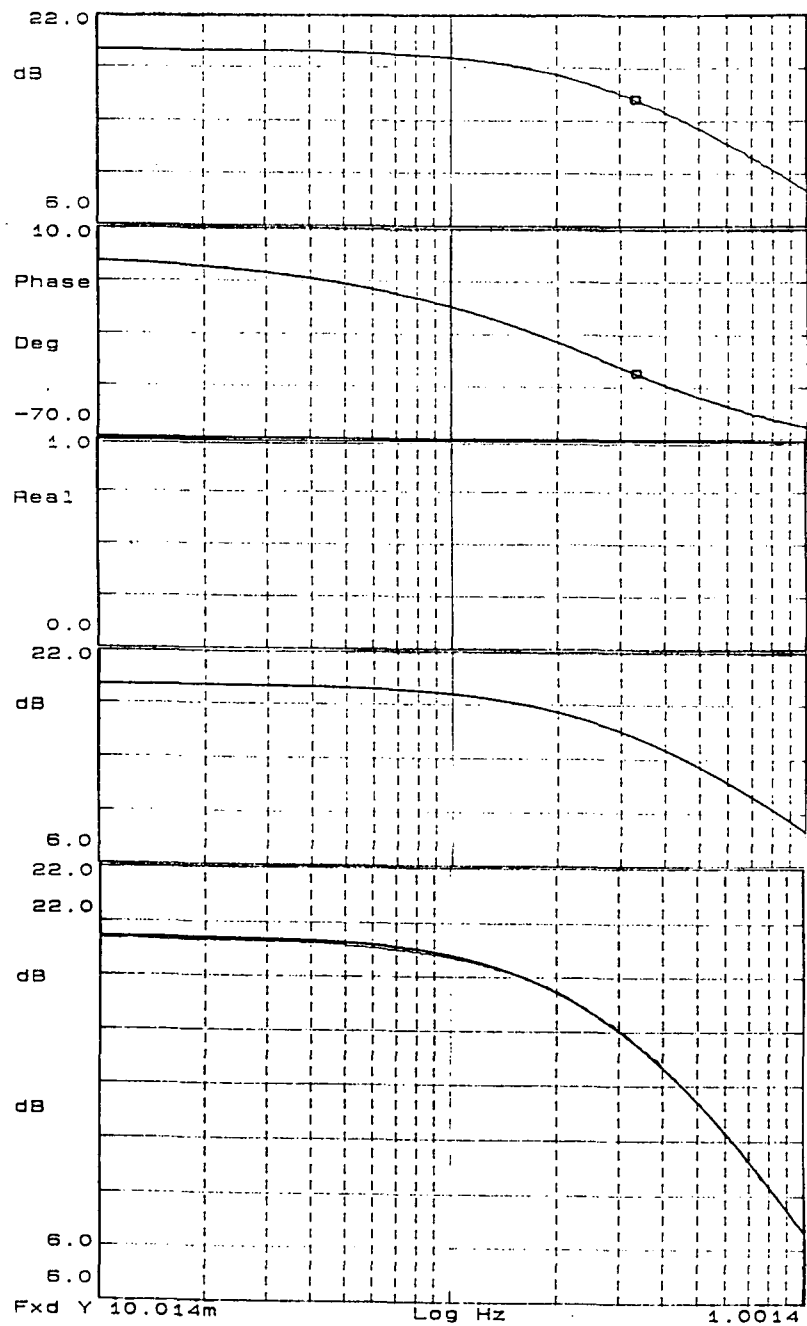


- a.- Diagrama de Bode para a amplitude.  
 $f_c = 40$  Hz.
- b.- Diagrama de Bode para a fase.
- c.- Curva de coerência do teste.
- d.- Curva FIT calculada pelo CSA.
- e.- Superposição da curva FIT e da curva de resposta em frequência.

S Curve Fit				
POLES		S	ZEROS	
1	-15.0851		-30.5176	
2	-1.98242		-2.50154	
3	-40.6427	±j 32.9444	17.0366	±j 206.196
Time delay= 0.0 S			Gain= -6.49051m	
Scale Frequency= 1.0				

- f.- Polos e zeros da função transferência

Figura 5.17 Resposta em frequência do servo-acionamento do eixo X para o caso de:COM acoplamento e COM filtro regulador de velocidade.

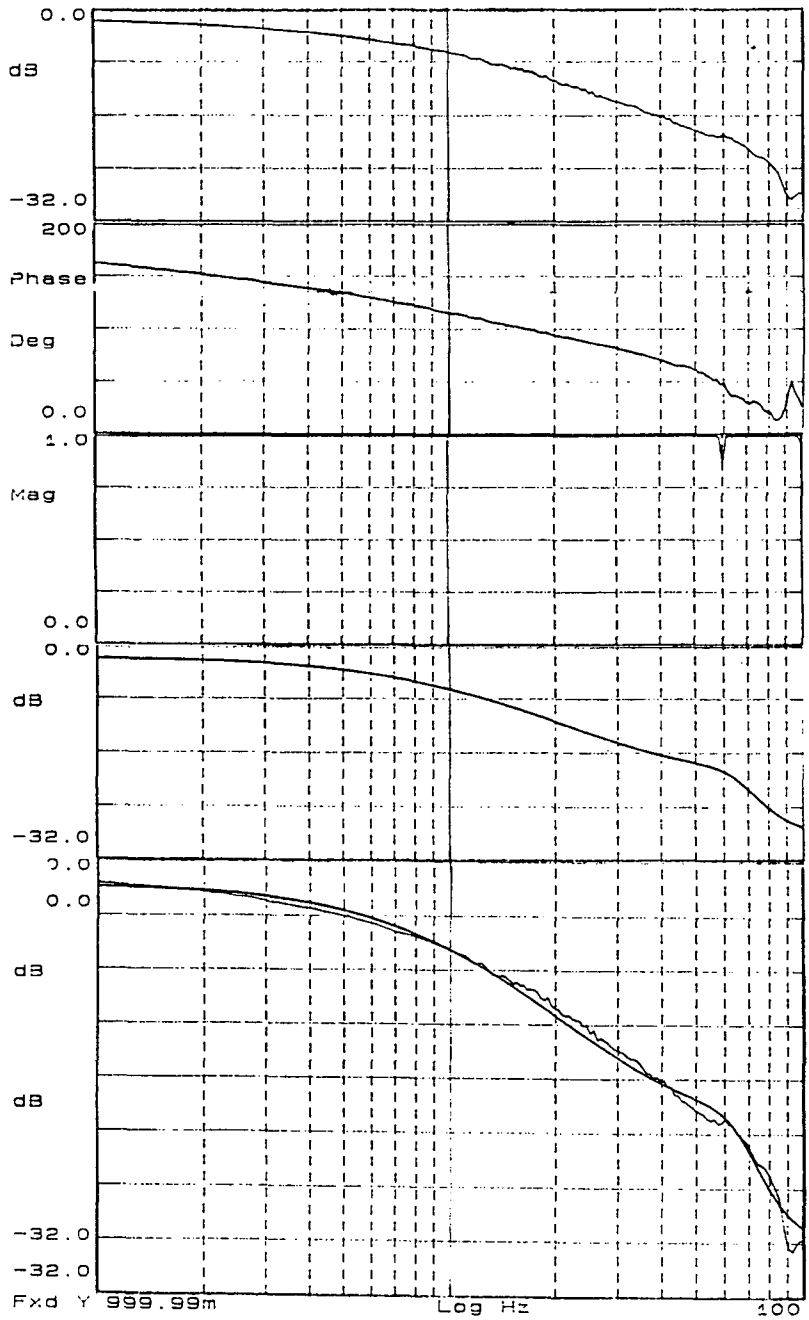


- a.- Diagrama de Bode para a amplitude.  
 $f_c = 0,33 \text{ Hz.}$
- b.- Diagrama de Bode para a fase.
- c.- Curva de coerência do teste.
- d.- Curva FIT calculada pelo CSA.
- e.- Superposição da curva FIT e da curva de resposta em frequência.

S Curve Fit			
POLES		ZEROS	
1	-402.295m	-8.66894	
2	-196.532m	-257.84m	*
Time delay= 0.0 S		Gain= 332.301m	
Scale Frequency= 1.0			

- f.- Polos e zeros da função transferência

Figura 5.18 Resposta em frequência do servo-acionamento do eixo Z para o caso de:SEM acoplamento e SEM filtro regulador de velocidade.



a.- Diagrama de Bode  
para a amplitude.  
 $f_c = 23 \text{ Hz.}$

b.- Diagrama de Bode  
para a fase.

c.- Curva de coerência  
do teste.

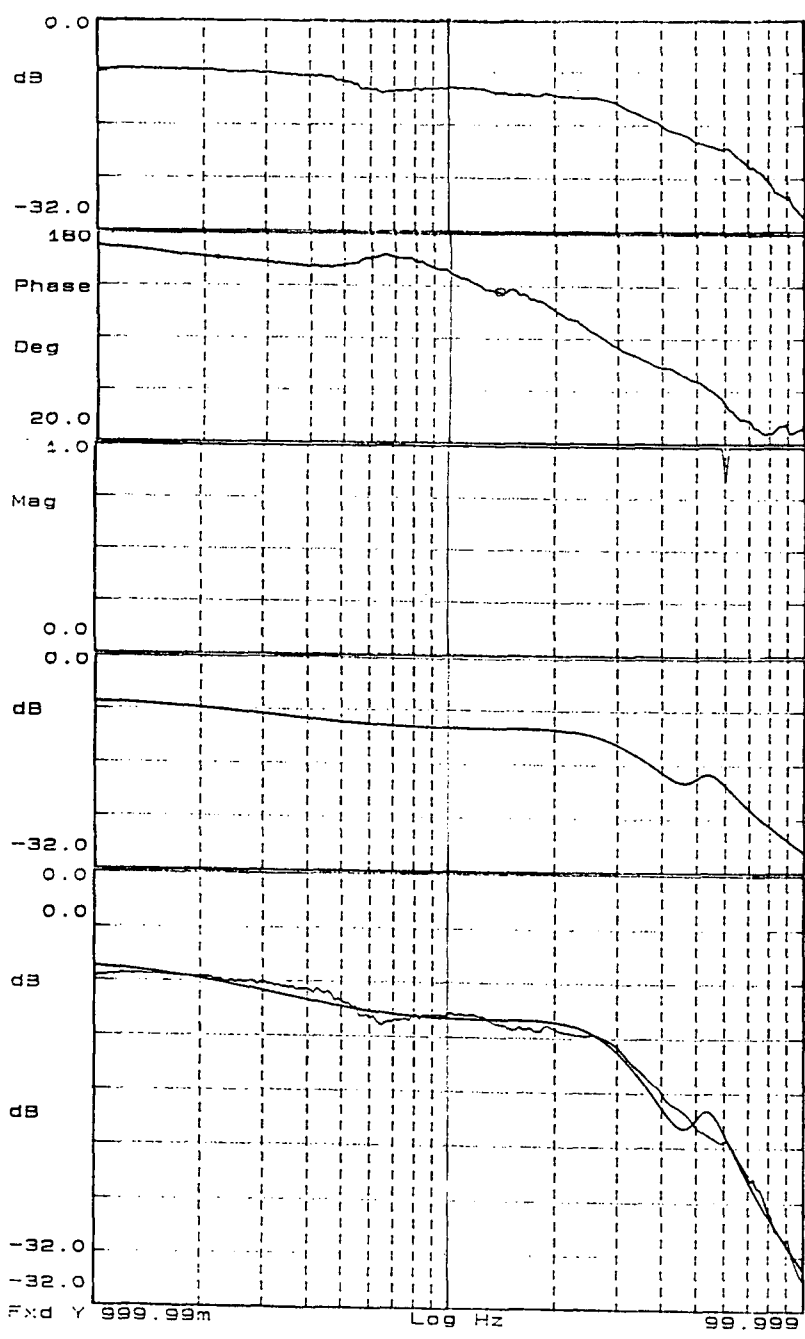
d.- Curva FIT calculada  
pelo CSA.

e.- Superposição da  
curva FIT e da  
curva de respos-  
ta em frequência.

S Curve Fit					
POLES			ZEROS		
		S			S
1	-5.47692		6.84478		
2	10.7074		25.0949		
3	16.9138		99.6059		
4	-18.7447 ± j	62.4513	-27.461 ± j	73.572	
Time delay= 0.0 S			Gain= 32.493m		
Scale Frequency= 1.0					

f.- Polos e zeros da  
função transfe-  
rencia

Figura 5.19 Resposta em frequência do servo-acionamento do eixo Z para o caso de:SEM acoplamento e COM filtro regulador de velocidade.



a.- Diagrama de Bode para a amplitude.  
 $f_c = 32$  Hz.

b.- Diagrama de Bode para a fase.

c.- Curva de coerência do teste.

d.- Curva FIT calculada pelo CSA.

e.- Superposição da curva FIT e da curva de resposta em frequência.

S Curve Fit					
POLES			ZEROS		
	5			5	
1	-2.50395			-163.924	
2	-16.3087 ±j 24.0428			-4.42744	
3	-7.12824 ±j 52.3843			259.661	
4				-7.99142 ±j 48.1489	
Time delay= 0.0 S			Gain= 6.21117m		
Scale Frequency= 1.0					

f.- Polos e zeros da função transferência

Figura 5.20 Resposta em frequência do servo-acionamento do eixo Z para o caso de:COM acoplamento e COM filtro regulador de velocidade.

A tabela 5.3 Resume os resultados obtidos dos ensaios de resposta em frequência, contendo para cada ensaio realizado, a frequência de corte " $\omega_0$ " e o ganho " $K_v$ ".

Tabela 5.3 Frequência de corte " $\omega_0$ " e o ganho " $K_v$ " obtido dos ensaios de resposta em frequência.

ensaio	eixo	gráfico	$\omega_0$	$K_v$
i	X	5.15	142 mHz	35,7
ii	X	5.16	5,1 Hz	58,8
iii	X	5.17	14 Hz	6,5
i	Z	5.18	333 mHz	332,3
ii	Z	5.19	4,8 Hz	32,5
iii	Z	5.20	13,9 Hz	6,2

## 5.6 RESULTADOS DOS ENSAIOS

Nas figuras 5.3 e 5.4 pode-se sentir a influência do filtro regulador da velocidade. O tempo de resposta do servo-acionamento do eixo "X" passa de 560 ms para 40 ms, e de 950 ms para 60 ms no servo-acionamento do eixo "Z".

Baseado na tabela 5.2 e nas figuras 5.7 a 5.14 que resume os resultados obtidos dos ensaios temporais, se pode destacar o seguinte:

Observando a série "a" dos gráficos 5.7 a 5.14, ou seja, para ambos eixo e indistintamente das configurações dos ensaios (com/sem acoplamento, com/sem filtro regulador da velocidade), a resposta sempre se pode aproximar ao caso de um elemento atrasador de primeira ordem ou então de segunda ordem com coeficiente de amortecimento " $D$ "  $> 1$ , isto é, super-amortecido ou resposta periódica.

Os gráficos dos ensaios temporais com filtro regulador da velocidade, (figuras 5.9, 5.10, 5.13 e 5.14), permitem observar um sinal do taco-gerador " $V_{tg}$ " com ruído de alta frequência. Cabe destacar que os amplificadores de potência empregados, são da década de 70 e o sinal pulsante da tensão gerada à saída da ponte tiristorizada se vê claramente nas figuras 5.9 e 5.10-a, onde o período do sinal de ondulação é da ordem de 6 ms, correspondendo a um amplificador de potência de seis tiristores um período de seu sinal de 3,3 ms. Com relação aos gráficos 5.13-a e 5.14-a o ruído de alta frequência é significativamente maior, indicando que o servo-acionamento do eixo "Z" e/ou o taco-gerador poderiam ter algum problema, (dever-se-ia estudar com detalhe esse servo-acionamento para avaliar a causa e fazer a manutenção ou troca dos elementos defeituosos).

A série "b" dos gráficos 5.7 a 5.14 permite ver o tempo morto do sistema, tempo que vai de 0,2 a 8 ms (medidos diretamente nos gráficos). Sabe-se que o tempo morto do amplificador de potência com seis tiristores pode ir de "0 a 6,6 ms", com valor esperado de 3,3 ms, magnitude que, em média, se aproxima dos resultados experimentais.

Da análise dos gráficos de resposta em frequência se pode observar o seguinte:

As figuras 5.15 (eixo X) e 5.18 (eixo Z) representam o diagrama de Bode do servo-acionamento sem acoplamento e sem filtro. Nelas pode-se ver que o comportamento do sistema pode se aproximar ao de um atrasador de primeira ordem. Já as figuras 5.16 e 5.17 (para eixo X) e figuras 5.19 e 5.20 (para eixo Z) representam o diagrama de Bode do servo-acionamento com filtro regulador de velocidade. Nestas se observa uma resposta com atrasador de ordem superior a um (1), a qual, ao aproximá-la a de um filtro de segunda ordem, resulta um coeficiente de amortecimento maior que um ( $D > 1$ ), isto é, super-amortecido. Ver item 5.7.



## 5.7 MODELAMENTO MATEMÁTICO DOS SERVO-POSICIONADORES "X" E "Z" DO TORNO CSEPEL ERI-250

### 5.7.1 INTRODUÇÃO

O diagrama de blocos do servo-posicionador analisado está mostrado na figura 5.21, onde se pode ver a cadeia de elementos que configuram o sistema.

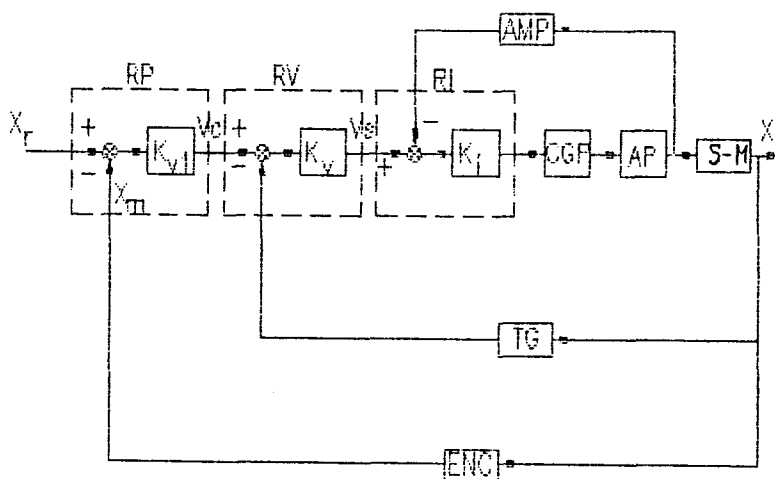


Fig. 5.21 Diagrama de blocos do servo-posicionador.

RP: regulador de posição, RV: regulador de velocidade, RI: regulador de corrente, CGP: circuito gerador de pulsos, AP: ponte retificadora tiristorizada para alimentação da armadura do servo-motor, S-M: servomotor CC, TG: taco-gerador CC, ENC: "encoder".

Com objetivo de simplificar o tratamento da modelação do servo-acionamento, é recomendável reduzir a configuração do diagrama de blocos à seus elementos fundamentais. A figura 5.22 mostra um diagrama simplificado do servo-posicionador.

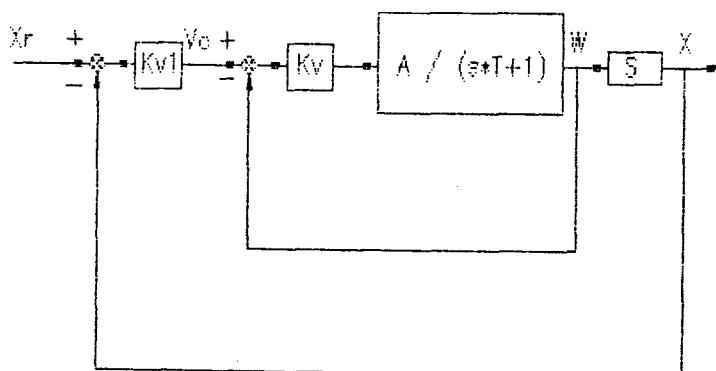


Fig. 5.22 Diagrama simplificado do servo-posicionador.

#### 5.7.2 MODELO MATEMÁTICO SIMPLIFICADO DO SERVO-MOTOR CC

O servo-motor de CC controlado pela corrente de armadura tem a função de transferência para o deslocamento angular do eixo do motor, dada por: /7/.

$$\frac{\theta(s)}{V_a(s)} = \frac{K_\theta}{s \cdot (R_a \cdot (F + s \cdot J) + K_b \cdot K_\theta)} \quad (5.1)$$

onde:

$\theta(s)$  : deslocamento do eixo do motor (rad);

$V_a(s)$  : tensão de armadura (volt);

- $R_a$  : resistência da armadura (ohm);  
 $F$  : coeficiente de atrito viscoso no eixo (N-m/rad.s);  
 $J$  : momento de inércia no eixo do motor (Kgm);  
 $K_b$  : constante do motor (Volt/rad.s);  
 $K_\eta$  : constante do motor (N-m/A).

A equação 5.1 pode reduzir-se a:

$$\frac{\theta(s)}{V_a(s)} = \frac{A}{s \cdot (T_l \cdot s + 1)} \quad (5.2)$$

Com:

$$T_l = J \cdot R_a / (R_a \cdot F + K_b \cdot K_\eta) \quad (5.3)$$

$$A = K_\eta / (R_a \cdot F + K_b \cdot K_\eta) \quad (5.4)$$

Da equação 5.2, se depreende que a velocidade angular do eixo do motor ( $W$ ), é dada por:

$$\frac{W(s)}{V_a(s)} = \frac{A}{T_l \cdot s + 1} \quad (5.5)$$

### 5.7.3 MODELO MATEMÁTICO BASEADO NOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS TEMPORAIS.

#### - Efeito da carga mecânica

Os parâmetros  $R_a$ ,  $K_b$  e  $K_v$  são constantes para cada servomotor e não variam ao modificar-se o valor da carga aplicada no eixo do motor, enquanto que os parâmetros  $F$  e  $J$  variam ao modificar-se o valor da carga aplicada.

Eixo "X":

Da figura 5.7 (sem acoplamento flexível e sem filtro regulador de velocidade), resulta uma resposta do tipo "elemento atrasador de primeira ordem" dada por:

$$\frac{V_{tg}}{V_c} = \frac{13,2}{1,15 \cdot s + 1} \quad (5.6)$$

Da figura 5.8 (com acoplamento flexível e sem filtro regulador de velocidade), se tem:

$$\frac{V_{tg}}{V_c} = \frac{4,1}{0,563 \cdot s + 1} \quad (5.7)$$

Baseado nas equações 5.3 a 5.7 resulta que:

- O momento de inércia do eixo "X" com acoplamento é 1,58 vezes maior que o momento de inércia sem acoplamento.
- O coeficiente de atrito viscoso do eixo "X" com acoplamento é  $(0,168 \cdot K_1/R_1)$  maior que o coeficiente de atrito viscoso sem acoplamento.

Eixo "Z":

Análogo ao eixo "X". Das figuras: 5.11 (sem acoplamento flexível é sem filtro) é 5.12 (com acoplamento flexível é sem filtro) para o eixo "Z" resulta:

$$\frac{V_{tg}}{V_c} = \frac{9,4}{0,612 \cdot s + 1} \quad (5.8)$$

$$\frac{V_{tg}}{V_c} = \frac{3,63}{0,447 \cdot s + 1} \quad (5.9)$$

De onde:

- O momento de inércia do eixo "Z" com acoplamento é 1,59 vezes maior que o momento de inércia sem acoplamento flexível.

- O coeficiente de atrito viscoso do eixo "Z" com acoplamento é  $(0,169 \cdot K_1 / R_1)$  maior que o coeficiente de atrito sem acoplamento flexível.

#### 5.7.4 MODELAMENTO MATEMÁTICO BASEADO NOS ENSAIOS DE RESPOSTA EM FREQUÊNCIA

Eixo "X" :

Do gráfico 5.16 (sem acoplamento flexível e com filtro).

Do 5.16 b; para  $f=20\text{Hz} \Rightarrow \phi(20\text{Hz})=90^\circ$ , então  $T=50 \text{ ms}$

Do 5.16 a; com  $f=20\text{Hz} \Rightarrow \text{dB} = -10 \cdot \text{Log}(4 \cdot D)$

resulta  $D = 1,26$

$$\lim_{f \rightarrow 0} F(f) = 20 \cdot \log(V_p)$$

De 5.16 a  $\Rightarrow F(0) = -3,65$

Por quanto  $V_p = 0,657$

Assim

$$\frac{V_{tg}}{V_c} = 0,657 \cdot \left( \frac{1}{1 + 2 s D T + (s T)^2} \right) \quad (5.10)$$

Para uma excitação de tipo degrau a resposta do eixo "X" no tempo é:

$$\frac{V_{tg}}{V_c} = 0,657 \cdot (1 - 1,33 \cdot e^{-(t/0,101)} + 0,33 \cdot e^{-(t/0,025)})$$

(5.11)

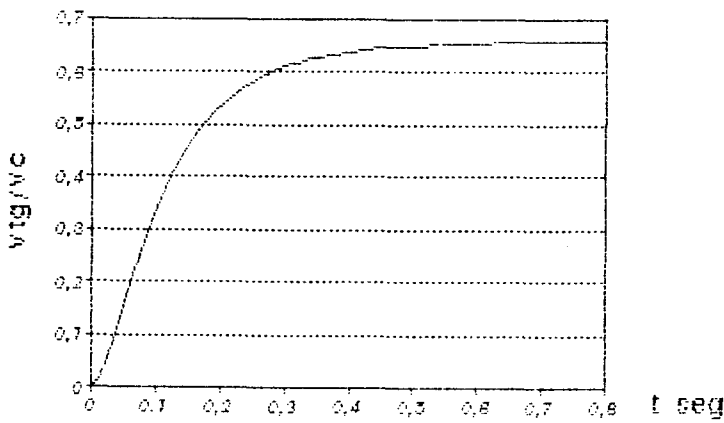


Figura 5.23 Simulação da resposta ao degrão (eq. 5.11)

Por um procedimento análogo se chega aos resultados resumidos na tabela 5.4

Tabela 5.4 Resumo dos parâmetros calculados baseado nos ensaios de resposta em frequência.

fig. Nº	acoplamento	filtro	f <sub>c</sub> Hz	T <sub>m</sub> ms	D	K <sub>v</sub>	obs. atrasador
5.15	sem	sem	0,142	7000	----	18,4	1º ordem
5.16	sem	com	20	50	1,26	0,66	2º ordem
5.17	com	com	40	25	1,26	0,56	2º ordem
5.18	sem	sem	0,333	3000	----	9,33	1º ordem
5.19	sem	com	22,3	45	1,55	0,83	2º ordem
5.20	com	com	31,6	32	1,02	0,42	2º ordem

## CAPITULO 6

### 6.- RESULTADOS, CONCLUSÕES E SUGESTÕES

A realização deste trabalho permitiu fazer o "retrofitting" do torno marca CSEPEL modelo ERI - 250, onde basicamente se trocou o NC original, (da década de 70), por um CNC, marca DYNAPATH modelo delta 20 T de última geração, (1992). Assim, começando de um torno NC totalmente desativado, procedeu-se o trabalho de atualização tecnológica do mesmo, resultando em, um torno CNC com todas suas funções disponíveis, isto é:

- Os servo-posicionadores dos eixos "X", "Z", trabalhando sem sobrepassagem.
- A troca automática de ferramenta, ( uma entre as 10 possíveis).
- A variação discreta de velocidade da árvore, em duas faixas: (63, 90, 125, 180, 250, 355, 500 e 710 RPM) e (125, 180, 250, 355, 500, 710, 1000 e 1400). A placa desenvolvida decodifica para selecionar a RPM mais próxima da solicitada no programa.
- Os sinais para o fim de curso dos eixos "X" e "Z". Dando segurança ao máximo percurso dos carros.
- As funções miscelâneas de: abrir/fechar as castanhas, conectar/desconectar o fluido refrigerante.
- Ponto de referência da máquina, (zero máquina). Por meio



da chave de referência e o sinal de "marca" do "encoder".

- Ponto de "zero absoluto", definido por parâmetros do CNC.

Dadas as limitações econômicas e de tempo, ocorridas no trabalho realizado, fica evidente que não foi possível implementar todas as idéias. Por isso, ficaram pendentes, entre outras, as seguintes tarefas:

- Alarme de emergência e o imediato bloqueio da árvore, assim que a pressão na unidade hidráulica cair abaixo de um valor predeterminado. Esta função é extremadamente necessária pelo perigo ao não se fixar a peça com a força necessária, e escapar da placa, sendo arremessada por força centrífuga.
- Manutenção da unidade hidráulica e unidade de lubrificação.
- Aquisição e instalação da unidade de refrigeração; a fonte de energia elétrica e os sinais para seu comando via programa NC ou por comando manual, já estão totalmente habilitados.
- Realizar ensaios de usinagem típicos com a máquina fixada à base.
- Controle dimensional e geométrico das guias e outros elementos sujeitos a desgaste.
- Medir o erro de posicionamento e a histerese mecânica nos posicionadores "X" e "Z", para fazer a compensação por software.
- Fazer acompanhamento do comportamento da máquina em operação.

Muitas das tarefas que ficaram pendentes não foram possíveis de realizar dado o caráter experimental/laboratorial do trabalho, o qual, devido a limitações econômicas para comprar os componentes faltantes ou defeituosos e ainda, devido a limitação de tempo do autor, impediram a completa realização do trabalho. Contudo, a máquina ficou operável.

Finalmente, o autor se permite recomendar, para futuros trabalhos de natureza semelhante, (onde se necessitem conhecimentos nas áreas de: mecânica, eletricidade, eletrônica, controle e automatização), que o desenvolvimento do projeto se realize com apoio de dois profissionais, um com conhecimentos de engenharia elétrica e outro de engenharia mecânica. Desta forma o trabalho poderia fluir melhor e ambos os profissionais se apoiariam e cresceriam mais rápido no conhecimento.

## REFERENCIAS BIBLIOGRAFICA

- /1/ - GROSS H. : Electrical Feed Drives For Machine Tools. Munich, John Wiley & Sons, 1983.
- /2/ - LITCHBLAU M. : Uma Contribuição ao Estudo da Dinâmica de Posicionadores. Dissertação de Mestrado, UFSC. 1989.
- /3/ - KUSKO A. : Solid-State DC Motor Drives. Cambrige, Massachusetts, 1969.
- /4/ - KRUGER P. : Retrofitting de Máquinas-Ferramentas, 1988.
- /5/ KRAUSE W. : Gerätexkonstruktion Veb Verlag Technik, Berlin, 1986.
- /6/ - LEONARD W. : Control of Electrical Drives, Berlin, 1985.
- /7/ - DE LIMA W. : Servo-motores - Aplicações, Florianópolis, 1983.

- /8/ - HEWLETT PACKARD : Catálogo do Analizador de Sistemas de Controle. C.S.A.
- /9/ - DYNAPATH : Catálogo do Controlador, 1992
- /10/ - ROBBINS & MYERS : DC. Motors - Speed Controls - Servo Systems, Fifth Edition.
- /11/ - RUBIO J. : Controlador Flexível Multi-eixo Para Acionamentos Fracionários de Alta Dinâmica. Dissertação de Mestrado, UFSC, 1992.
- /12/ - ROMERO H. : Relatório das Conexões do Torno CSEPEL-ERI - 250, UFSC, 1994.
- /13/ - SIMON A. : Retrofitting e Reforma, Duas Formas de Melhorar a Produção; Máquinas e Metais Outubro 1990.
- /14/ - SIEMENS : Introducción al Control Electrónico, Barcelona, 1986.
- /15/ - BARCZAK C. : Uma Introdução a Análise de Sistemas Lineares, São Paulo, 1977.

- /16/ - BREVES L. : Modernização e Análise Dinâmica de uma Máquina Ferramenta NC, Dissertação de Mestrado, UFSC, 1994.
- /17/ - OGATA K. : Dinâmica de Sistemas, México. 1987.
- /18/ - KATZ P. : Digital Control Using Microprocessors, Englewood Cliffs, 1981.
- /19/ - W.E.G. : Manual de Motores Elétricos, Catálogo 511.10.1689 PE.
- /20/ - W.E.G. : Técnicas de Acionamentos com velocidade variável, Informações Técnicas DT-10.
- /21/ - TECNOS : La Automatización Programable en la Metalmecánica Colombiana, Bogotá, 1991.
- /22/ - FLESCH C. : Circuitos Electro-eletrônicos Básicos em Medição e Automação, Apostila UFSC, Florianópolis.
- /23/ - BRAGA N. : Circuitos & Informações, Vol 1, São Paulo, 1985.

- /24/ - GOLBERI : Características de Componentes Eletrônicos, ETFSC, Florianópolis, 1990.
- /25/ - MALVINO A. : Microcomputadores e Microprocessadores, Rio de Janeiro, 1985.
- /26/ - MALVINO A. : Eletrônica Digital Princípios e Aplicações, Lógica Combinacional, Vol 1, Rio de Janeiro. 1988.
- /27/ - MALVINO A. : Eletrônica, Vol 1, 2, Rio de Janeiro, 1987.
- /28/ - JUNG W. : Ic Op-Amp Cookbook, Third Edition, Indiana USA, 1992.
- /29/ - MORRISON R. : Grounding and Shielding Techniques in Instrumentation. 3rd. Edition, New Jork USA, 1987.
- /30/ - MARTIN C. : Sistemas de Comando/Controle, Apostila, UFSC, Florianópolis.
- /31/ - D'AZZO J. : Análise e Projeto de Sistemas de Controle Lineares. 2ed. Guanabara, Dois, 1984.

- /32/ - WECK : Hanbook of Machine Tools, Vol 1, 2, 3  
y 4, Chichester, 1984.
- /33/ - DAVIDSON : Handbook of Precision Engineering,  
Vol 6, New York, 1972.
- /34/ - BARBI I. : Teoria Fundamental do Motor de  
Indução. Editora da UFSC,  
Florianópolis, 1985.
- /35/ - SHIGLEY J. : Diseño en Ingenieria Mecánica, Cuarta  
Edición, México.
- /36/ - OLIVEIRA N. : Acionamento de Avanço Para Máquinas-  
ferramentas e Robôs. Comparações Entre  
as Técnicas CA/CC., II Seminário de  
Eletrônica de Potência IEEE.
- /37/ VALENTINO J. & : Introduction to computer Numerical  
GOLDENBERG J. Control; Englewood Cliffs,  
New Jersey, 1993.